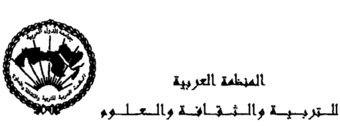


الطاقة وسلامة البيئة

تأليف: Nikolai V. Khartchenko

ترجمة : الدكتور بسام حمود

مراجعة: المهندس نزيه يانس



المركز العربي
للتعريب والترجمة والتأليف والنشر

الطاقة
وسلامة البيئة

الطاقة وسلامة البيئة

تأليف

Nikolai V. Khartchenko

ترجمة

الدكتور بسام حمود

مراجعة

المهندس نزيه يانس

دمشق 2000

Umweltschonende Energietechnik

Nikolai V. Khartchenko

Published in Arabic by Agreement with the original publisher Vogel Verlag und Druck GmbH & Co KG, Würzburg.

الطاقة وسلامة البيئة
ترجمة: د. بسام حمود
المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر بدمشق
ص.ب: 3752 ــ دمشق ــ الجمهورية العربية السورية
هاتف: 3334876 11 963 + – فاكس: 3330998
E-mail: acatap@net.sy
Web Site: www.acatap.htmlplanet.com

مقدمة المؤلف

يجب أن تحقق تقانة الطاقة الحديثة ثلاثة معايير: الكفاءة العالية لعملية تحويل الطاقة والاقتصادية إضافة إلى تقبّل البيئة لنتائجها. وكلما ارتفع مردود آلة حرارية قلّ تدفق الوقود لواحدة الاستطاعة، ومن ثمّ قلّ انبعاث المواد الضارة من محطة توليد الطاقة لكل واحدة من الطاقة الكهربائية المستجرة.

يمكن الحد من مشكلة تخفيض ما ينطلق من ثانـــي أكسيد الكربون في منشآت الطاقة إما بالاستعاضة عن أنواع الوقود بأنواع أخرى أو برفع المردود.

من أجل الوصول إلى مردود أعلى عند تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة كهربائية مع تخفيض انبعاثات المواد الضارة في نفس الوقت، يجب استخدام تقانات تحويل متطورة ومواد ذات مواصفات عالية عند إنتاج عناصر (مكونات) محطة توليد الطاقة التـــي تتعرض للإجهادات الحرارية (مولد البخار والعنفة البخارية في محطة توليد الطاقة البخارية، حجرة الاحتراق والعنفة الغازية في منشآت الطاقة الغازية)، وهذا مرتبط بتكاليف إضافية باهظة. تسمح الحراقات الحديثة ومعدات الاحتراق بالإضافة إلى حجرات الاحتراق بتخفيض إطلاق المواد الغازية الضارة الملوثة للبيئة بشكل كبير.

يعالج هذا الكتاب تقانات الطاقة سواءً التقليدية أو البديلة، كذلك يعطي القارئ فكرة عن معدات الطاقة التـــي لا تزال قيد التطوير والتـــي ستحدد تقانة الطاقة في القرن الحادي والعشرين، وهذا ينطبق بخاصة على محطات الدارات المركبة (المشتركة). لقد استخدمت في القرن العشرين المحطات البخارية لتوليد الطاقة الكهربائية من حوامل الطاقة الأحفورية (المستحاثية) والنووية. ومنذ الآن بدأ التحول في محطات الطاقة التـــي تقام حديثاً إلى محطات الدارة المركبة ذات العنفات الغازية والبخارية بالاعتماد على العنفات الغازية العالية الكفاءة من الأجيال الجديدة. كما يُدعَّم هذا المنحى بشدة ويُوسَّع مجال استخدام المنشآت المركبـــة ليشمل المنشآت التـــي تستخدم خلايا الوقود ومولدات MHD، وهكذا يتم الوصول إلى قيم للمردود تصل حتـــى 60 %.

أما وقود الفحم "غير النظيف" فيمكن بواسطة تحويله إلى غاز أن يصبح وقوداً نظيفاً. وسيتم التعرض كذلك إلى عمليات التحويل إلى غاز وإلى إدخال آلات التحويل إلى غاز في محطات الدارة المركبة ذات العنفات الغازية والبخارية. تتألف محطات الدارة المركبة من العناصر المألوفة في العنفات الغازية والبخارية معاً. ولكي يتم تحقيق مردود أعظمي تستخدم أعلى قيم (بارامترات) لوسيط العمل (غازات الاحتراق، بخار الماء) في الجزء الموافق لكل من منشأة العنفة الغازية والبخارية. أما مولد MHD فيحتاج إلى درجات حرارة أعلى (حتـــى 2700 K). ولا يمكن استخدام هذه التقانات بنجاح إلاّ عن طريق رفع قدرة المواد اللازم تطويرها على تحمل درجات الحرارة العالية.

يعالج هذا الكتاب كل الجوانب الفيزيائية والفنية لتقانة الطاقة التـــي تحافظ على البيئة، كما تمت مناقشة الوضع الراهن لمرحلة التطور بالإضافة إلى المشاكل الواجب حلّها عند تطوير التقانات الحديثة وتمّ ربط ذلك بالجوانب الاقتصادية.

بالإضافة إلى الأساليب المألوفة في هندسة الطاقة، والطرائق المطوّرة حديثاً والتـــي تعتمد على استخدام الوقود الأحفوري، فقد عولج في هذا الكتاب استخدام مصادر الطاقة الجديدة في توليد الكهرباء بالإضافة إلى أساليب الوفر والحدّ من الهدر كأحد مصادر الطاقة.

إن هذه التقانات البديلة أكثر رفقاً بالبيئة من محطات توليد الطاقة المألوفة، ولكن تكاليفها العالية تجعل استخدامها حتـــى الآن وللأسف محدوداً. وبتحقيق نضج فنـــي مترافق مع تخفيض التكاليف، فإنها ستلاقي في المستقبل استخداماً أوسع.

لدى معالجة التقانات المختلفة تمّ استعراض المبادئ الأساسية في هندسة الحرارة والجريان، كما تمّ وصف عمليات التركيب والتصميم المتبعة في مختلف الحالات. وهناك عدد كبير من الأمثلة التـــي توضّح كيفية التخطيط لمحطات توليد الطاقة. أما القيم المميزة والمؤشرات (البارامترات) الترموديناميكية فهي معطاة على شكل جداول أو مخططات في الملحق.

يتوجه هذا الكتاب قبل كل شيء إلى الطلاب والمهندسين المهتمين بتقانات الطاقة المتقدمة، كذلك يمكن استخدامه ككتاب تدريسي في مواد مختلفة مثل هندسة الطاقة وهندسة طرائق معالجة المواد والهندسة البيئية.

برليـــن **نيكولاي خارتشينكو**

المحتويات

1 هندسة الطاقة - مبادئ في الترموديناميك والجريانات

1.1 الطاقة والاستطاعة

أشكال الطاقة

!	*الطاقة هي القدرة على إنجاز عمل.*

تظهر الطاقة في أشكال مختلفة مثل الطاقة الحركية E_k أو الكامنة E_p أو الداخلية U، أو على شكل حرارة Q أو عمل ميكانيكي W أو طاقة كهربائية E_{el}، أو طاقة ارتباط الذرات E أو طاقة التفاعلات الكيميائية ΔE_R... إلخ.

يمكن التعبير عن العمل الميكانيكي بالعلاقة التالية:

$$W = F \cdot s \text{ [J]} \qquad (1.1)$$

حيث: F القوة مقدرة بالنيوتن [N]

s طول المسار في اتجاه تأثير القوة مقدراً بالمتر [m].

يستخدم الجول واحدة أساسية لقياس الطاقة و $1J = 1N \cdot 1m$. كما يمكن قياس الطاقة بالكيواط الساعي. أما التحويلات بين J و kWh فهي: $1\text{ MJ} = 0.278\text{ kWh}$ و $1\text{kWh}=3.6\text{ MJ}$.

من أجل الكميات الكبيرة من الطاقة تستخدم الواحدات التالية:

1PJ (Pentajoule) = 10^{15} J بنتاجول   1EJ (Exajoule) = 10^{18} J إكسا جول

1GJ (Gegajoule) = 10^{9} J جيغاجول   1TJ (Terajoule) = 10^{12} J تيراجول

1kJ (Kilojoule) = 10^{3} J كيلوجول   1MJ (Megajoule) = 10^{6} J ميغا جول

وتستخدم أحياناً واحدة تدعى واحدة الفحم المكافئ (TCE) حيث 1TCE = 29308 MJ وكذلك واحدة تدعى واحدة النفط المكافئ (TOE) حيث 1TOE = 41868 MJ.

الطاقة الحركية هي:

$$E_k = {}^1/_2\, m\, w^2 \quad [J] \tag{2.1}$$

حيث: m الكتلة بالـ [kg]

w السرعة [m/s].

أما الطاقة الكامنة فهي ترتبط بالموقع وتحسب من العلاقة:

$$E_p = g\, m\, H \quad [J] \tag{3.1}$$

حيث: g التسارع الأرضي [m²/s]

H الارتفاع عن مستو مرجعي [m].

عند استخراج الطاقة أو تحويلها أو استخدامها يمكن التمييز بين مصادر الطاقة التقليدية أو البديلة وكذلك بين كل من الطاقة المفيدة الأولية أو الثانوية أو النهائية أو المفيدة. من مصادر الطاقة التقليدية هناك أنواع الوقود الأحفوري (المستحاثي) مثل الفحم، التورف (فحم المستنقعات)، الخشب، الغاز الطبيعي والنفط. وهناك أنواع من الوقود تنتج صناعياً مثل غاز الفحم، الغاز المُميَّع، فحم الكوك، هذا بالإضافة إلى النفايات القابلة للحرق. أما مصادر الطاقة المتجددة أو البديلة (غير التقليدية) فهي الطاقة الشمسية، طاقة الرياح، طاقة المياه، الطاقة الحرارية لجوف الأرض وطاقة الكتلة الحيوية. الطاقة الأولية هي طاقة منبع الطاقة دون تحويل، مثل الطاقة الشمسية والطاقة الكيميائية للوقود المستحاثي، أما الطاقة الثانوية فهي الطاقة بعد تحويلها إلى شكل آخر مثل التيار الكهربائي، القوة، الطاقة الحرارية، وهي تحسب بالاستعانة بمردود منشأة أو جهاز تحويل الطاقة (محطة الطاقة، محرك الاحتراق، مرجل التسخين). الطاقة النهائية هي الطاقة المتاحة للمستهلك، وتساوي الطاقة الثانوية مطروحاً منها ضياعات الطاقة بفعل النقل والتوزيع. الطاقة المفيدة هي الطاقة التي تستخدم لغرض معين مفيد.

الجدول 1.1: الطاقة والاستهلاك والمدة التي تكفي من أجلها أنواع الوقود المستحاثي في العالم

الوقود	الاحتياطي بمليارات الأطنان من الفحم المكافئ	الاستهلاك بمليارات الأطنان من الفحم المكافئ	المدة التي يكفي لها بالأعوام
الفحم	1031.6	4.6	224
النفط	197.6	4.4	45
الغاز الطبيعي	196.6	2.6	65

إن احتياطي العالم من حوامل الطاقة ذات المصدر المستحاثي محدود، ويبين الجدول (1.1) معطيات عن احتياطات الطاقة المؤكدة وكذلك الاستهلاك والمدة التي يكفي لها كل من الفحم والنفط والغاز الطبيعي.

الاستطاعة

هي الطاقة في واحدة الزمن

$$P = W / t \quad [\mathrm{W}] \tag{4.1}$$

واحدة الاستطاعة هي الواط و 1 W يساوي 1 J/s. كذلك تستعمل واحدات أخرى للاستطاعة من مضاعفات الواط هي: $1\mathrm{kW} = 10^3$ W، $1\mathrm{MW} = 10^6$ W، $1\mathrm{GW} = 10^9$ W.

2.1 القوانين الأساسية في الترموديناميك

القانون الأول في الترموديناميك

تجري عمليات تحويل الطاقة في جمل (منظومات) ترموديناميكية مغلقة أو مفتوحة، وينص القانون الأول في الترموديناميك على أنه من أجل جملة ترموديناميكية مغلقة يتحقق ما يلي:

$$\delta q = \delta u + \delta w \quad [\mathrm{J/kg}]$$

$$Q = \Delta U + W \quad [\mathrm{J}] \tag{5.1}$$

حيث: Q كمية الطاقة الحرارية المقدمة إلى الجملة أو المطروحة منها

ΔU تغير الطاقة الداخلية للجملة

W العمل الناتج عن تغير الحجم.

ويُقبل في كثير من الأحيان، عند إجراء تحليل ترموديناميكي بأن وسيط العمل يتصرف كما لو أنه غاز مثالي. ويمكن اعتبار معظم الغازات عند ضغوط معتدلة ودرجات حرارة عالية بمثابة غازات مثالية، أي عبارة عن وسيط ذي جزيئات كتلة ولكن ليس لها حجم، ولا توجد بينها قوى تجاذب. بيد أن هذا النموذج (أي الغازات الكاملة) لا ينطبق على بخار الماء ووسائط العمل البخارية.

يمكن حساب تغير الطاقة الداخلية لغاز مثالي من العلاقة:

$$\delta u = C_{\mathrm{v}}\, \delta T \quad [\mathrm{J/kg}]$$

$$\Delta U = m\, C_{\mathrm{v}} (T_2 - T_1) \quad [\mathrm{J}] \tag{6.1}$$

حيث: C_v السعة الحرارية بثبوت الحجم [J/kg K]

T درجة الحرارة [K]، والدليلان 1 و2 يشيران إلى الحالة الأولى والنهائية على التوالي.

من أجل الحرارة المضافة أو المطروحة يمكن كتابة المعادلة التالية بالشكل التفاضلي:

$$\delta Q = m\,T\,\delta s \text{ [J]} \quad \text{أو} \quad \delta q = T\,\delta s \text{ [J/kg]} \tag{7.1}$$

وبطريقة مماثلة فإن العمل الناتج عن تغير الحجم:

$$\delta W = m\,\mathrm{d}w = p\,\delta V \text{ [J]} \quad \text{أو} \quad \delta w = p\,\delta v \text{ [J/kg]} \tag{8.1}$$

حيث: m الكتلة [kg].

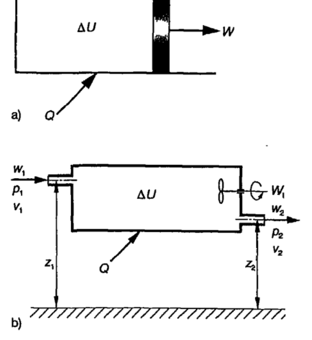
T درجة الحرارة [K].

s الانتروبـــي النوعي لوسيط العمل [J/kg K].

p الضغط [Pa].

v الحجم النوعي لوسيط العمل [m³/kg].

V حجم وسيط العمل [m³].



الشكل 1.1 : (a) جملة ترموديناميكية مغلقة (b) جملة مفتوحة.

بمكاملة المعادلتين (7.1) و(8.1) تنتج الحرارة Q والعمل W من أجل عملية ترموديناميكية، وهما تابعان لتغيرات حالة وسيط العمل. لحساب الحرارة المضافة أو المطروحة في عملية ايزوبارية (ثابتة الضغط) وباستخدام غازٍ مثالي يمكن مثلاً كتابة:

(9.1) $$Q = m\,C_p\,(T_2 - T_1) \quad [J]$$

حيث: C_p السعة الحرارية للغاز بثبوت الضغط [J/kg K]. الدليلان 1 و2 يشيران إلى حالة الجملة في البداية والنهاية.

يمكن بطريقة مماثلة أيضاً حساب العمل في العملية الايزوبارية (بثبوت الضغط):

(10.1) $$W = m\,p\,(v_2 - v_1) = p\,(V_2 - V_1) \quad [J]$$

ينص القانون الأول في الترموديناميك من أجل جملة ترموديناميكية مفتوحة (كما في الشكل b.1.1) يمر عبرها وسيط عمل، على ما يلي:

(11.1) $$Q = \Delta H + \Delta E_k + \Delta E_p + W_t \quad [J]$$

حيث: Q الحرارة المضافة أو المطروحة.

ΔE_k، ΔE_p تغير الطاقة الحركية والكامنة للوسيط العامل

W_t العمل المحرِّك (يختلف عن العمل الذي يسببه تغير الحجم pdv)*.

بالتعويض عن كل حد بقيمته في المعادلة (11.1) نجد:

(12.1) $$Q = \Delta H + m\,(w_2^2 - w_1^2)/2 + m\,g\,(z_2 - z_1) + W_t \quad [J]$$

حيث: m الكتلة [kg].

w سرعة الجريان [m/s].

g التسارع الأرضي [m/s²].

z موقع المقطع بالنسبة لمسكن مرجع، الدليلان 1 و2 يشيران إلى مقطعي الدخول والخروج.

أما تغير الإنتالبي لغاز مثالي فهو:

(13.1) $$\Delta H = H_2 - H_1 = m\,c_p(T_2 - T_1) \quad [J]$$

مثال 1.1

ما هي قيمة العمل الناتج عن تغير الحجم، تغير الطاقة الداخلية، تغير الانتالبي لـ 12 kg هواء عندما تُضاف كمية 3.618 MJ حرارة بثبوت الضغط الذي قيمته 5 bar.

---

* المترجم.

السعة الحرارية بثبوت الضغط للهواء تبلغ 1.005 kJ/kg،ثابت الغاز للهواء $R = 0.287$ kJ/kgK.

الحل:

1. تغير درجة الحرارة

$$\triangle T = T_2 - T_1 = Q / m\, c_p$$
$$= 3618 \text{ kJ} / 12 \text{ kg} \times 1.005 \text{ kJ/kg K} = 300 \text{ K}$$

2. العمل الناتج عن تغير الحجم

$$W = p\,(V_2 - V_1) = m\, R\,(T_2 - T_1)$$
$$= 12 \text{ kg} \times 0.287 \text{ kJ/kg K} = 1033.2 \text{ kJ}$$

3. تغير الطاقة الداخلية للهواء: حسب القانون الأول في الترموديناميك

$$\triangle U = Q - W$$
$$= 3618 \text{ kJ} - 1033.2 \text{ kJ} = 2584.8 \text{kJ}$$

4. في التحول الايزوبابري يكون تغير الإنتالبي للهواء مساوياً للطاقة المضافة:

$$\triangle H = Q = 3618 \text{ kJ}$$

ويحسب العمل المحرِّك بشكل تفاضلي كما يلي:

$$\delta w_t = -\upsilon\, \delta p \text{ in J/kg}$$

أو:

$$\delta W_t = -m\, \delta\, w_t = -V \delta p \quad [\text{J}] \qquad (14.1)$$

بمكاملة المعادلة (14.1) ينتج العمل المحرك لعملية ترموديناميكية. فمثلاً من أجل تمدد ايزونتوربـــي لغاز مثالي ضمن عنفة غازية يمكن أن نكتب:

$$W_t = k\,(p_1 V_1 - p_2 V_2) / (k - 1) \quad [\text{J}] \qquad (15.1)$$

حيث: k أس الايزونتري (يساوي 1.4 من أجل الهواء).

القانون الأول في الترموديناميك من أجل دورات العمل

يتم في الآلات الحرارية تحويل الحرارة إلى عمل، ومن هذه الآلات العنفات الغازية والبخارية ومحركات الاحتراق. يجري تحليل عمليات الطاقة في هذا الآلات بناءً على القوانين الأساسية للترموديناميك. وتعمل الآلة الحرارية عادة وفق دورة عمل محددة. يتم في جزء من دورة العمل إضافة الحرارة (Q_s) من مصدر حراري ذي درجة حرارة عالية إلى وسيط العمل (مثلاً بخار الماء،

غازات الاحتراق) ويتحول جزء من الحرارة المضافة إلى عمل مفيد، أما الباقي (Q_R) فيطرح إلى الوسط الخارجي (ماء التبريد، الهواء الخارجي) ويقع مجال درجات الحرارة بين T_{max} و T_{min}. فمثلاً تتألف دورة عنفة غازية من انضغاط أدياباتي (كظيم) وإضافة للحرارة بثبوت الضغط ثم تمدد كظيم وأخيراً طرح للحرارة بثبوت الضغط.

يكون تغير الطاقة الداخلية لوسيط العمل من أجل دورة عمل معدوماً، ولذلك ينص القانون الأول في الترموديناميك من أجل دورة عمل على ما يلي:

$$W_u = Q_u \tag{16.1}$$

حيث العمل المفيد:

$$W_u = W_{exp} - W_{comp} \tag{17.1}$$

والحرارة المفيدة:

$$Q_u = Q_s - Q_R \tag{18.1}$$

حيث: W_{exp} عمل التمدد، W_{comp} عمل الانضغاط،

Q_s الحرارة المضافة، Q_R الحرارة المطروحة.

المردود الحراري لدورة عمل معينة هو نسبة العمل المفيد إلى الحرارة المضافة:

$$\eta_{th} = W_u / Q_s \tag{19.1}$$

القانون الثانـــي في الترموديناميك

ينص القانون الثانـــي:

على أن الإنتروبي S لجملة كظيمة مغلقة لا يمكن أن يتناقص أبداً، حيث يبقى ثابتاً في العمليات العكوسة، ويزداد في العمليات غير العكوسة:

$$\Delta S_{ad} \geq 0 \tag{20.1}$$

وبحسب القانون الثانـــي في الترموديناميك فإن جزءاً فقط من الحرارة المضافة يتحول إلى عمل مفيد.

تكون الطاقة المكتسبة من أجل جملة ما أعظمية إذا أوصلت الجملة إلى حالة مماثلة للوسط الخارجي بعملية عكوسة.

يمكن وصف قدرة جملة على تقديم العمل عن طريق ما يسمى بـ "الإكسرجي وهو يساوي العمل المحرك الأعظمي الذي تستطيع جملة معينة أن تقدمه عند شروط محيطية محددة .*

تتألف الطاقة الحرارية من الإكسرجي E_0 والطاقة الضائعة أثناء عملية تحويل الطاقة B_0:

$$Q = E_0 + B_0 \quad [J] \tag{21.1}$$

يمكن حساب الإكسرجي من العلاقة:

$$E_0 = Q\,(1 - T_{amb} / T) \tag{22.1}$$

حيث: T درجة حرارة الجملة، T_{amb} درجة حرارة الوسط المحيط [K].

ويمكن تحويل الإكسرجي فقط إلى عمل، ولا يمكن للطاقة الحرارية للوسيط المحيط أن تقوم إنجاز أي عمل.

تكتب الطاقة النوعية المنسوبة إلى 1 kg من الوسيط العامل كمايلي:

$$e = h - T_{amb} \cdot s \quad [J/kg] \tag{23.1}$$

حيث h الانتالبي النوعي، s الانتروبي النوعي

T_{amb} درجة حرارة الوسط المحيط.

يُعطى الضياع في العمل المحرك النوعي عند إجراء تغير غير عكوس في الحالة لجملة بالمقارنة مع شروط محيطية معينة كما يلي:

$$w_{t,L} = \Delta e = h_1 - h_2 - T_{amb}\,(s_1 - s_2) \quad [kJ/kg] \tag{24.1}$$

ومردود الإكسرجي لعملية ما هو كما يلي:

$$\eta_{ex} = 1 - E_L / E_{used} \tag{25.1}$$

حيث: E_L ضياع الإكسرجي [J]

E_{used} الإكسرجي المستخدم [J].

يمكن حساب ضياع الإكسرجي في بعض التطبيقات العملية كمايلي:

أ – عند انتقال الحرارة من وسط درجة حرارته T_1 إلى وسط آخر درجة حرارته T_2 (عند درجة حرارة للوسط المحيط T_{amb}):

$$E_L = T_{amb} \cdot Q\,(T_1 - T_2) / T_1 T_2 \tag{26.1}$$

* Exergy: الإكسرجي: هو الجزء من الطاقة الذي يتحول فعلاً إلى الشكل الآخر المطلوب للطاقة (عند تحويل الطاقة من شكل إلى آخر (المترجم).

ب – عند مزج غازين مثاليين (كتلتهما m_1 وm_2، ثابتا الغازين R_1، R_2، الضغط الإجمالي p والضغوط الجزئية p_1، p_2):

$$E_L = T_{amb} \cdot (m_1 R_1 \ln p / p_1 + m_2 R_2 \ln p / p_2) \quad (27.1)$$

جـــ – بفعل انخفاض الضغط من p_1 إلى p_2 عند تعريض غازٍ مثالي للاختناق:

$$E_L = m\,R\,T_{amb} \ln p_1 / p_2 \quad (28.1)$$

مثال 2.1

ما هي قيمة الإكسرجي النوعية لبخار الماء عند ضغط 30 bar ودرجة حرارة 500 °C إذا كانت درجة حرارة المحيط $T_{amb} = 20°C$.

الحل:

من الجداول نجد أنه عند $p = 30bar$ و$T = 500°C$ يكون $h = 3455$ kJ/kg و$s = 7.245$ kJ/kg K وبالتالي بالإكسرجي النوعية:

$$e = h - T_{amb}\, s$$
$$= 3455 \text{ kJ / kg} - 293 \text{ K} \times 7.245 \text{ kJ/kg K} = 1332.2 \text{ kJ/kg}$$

مثال 3.1

ما هي قيمة ضياع العمل النوعي بفعل تشتت الطاقة في مكثف عنفة بخارية عندما تكون مواصفات البخار للعنفة كما يلي: $p = 4$ kPa و$x = 0.87$؟ درجة حرارة الوسط المحيط 20 °C.

الحل:

a) عند $p = 4$ kPa و$x = 0.87$ لبخار الماء فإن $h_1 = 2237.5$ kJ/kg و$s_1 = 7.435$ kJ/kg وللبخار الذي تحول إلى ماء متكاثف $s_2 = 0.4225$ kJ/kg K و$h_2 = 121.41$ kJ/kg.

b) ضياع العمل النوعي بفعل تشتت الطاقة:

$$W_{t,L} = h_1 - h_2 - T_{amb}\,(s_1 - s_2)$$
$$= 2237.5 - 121.41 - 293\,(7.435 - 0.4225) = 61.43 \text{kJ/kg}$$

3.1 دورة كارنـــو

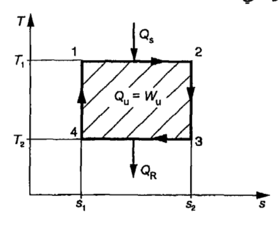
تتم دورة كارنو المثالية بين درجتي الحرارة T_1 (مصدر الحرارة) و T_2 (جهة تصريف الحرارة) بدون ضياعات حرارية وتتضمن التحولات العكوسة التالية للغاز المثالي:

a) تمدد بثبوت درجة الحرارة 1 – 2

b) تمدد بثبوت الايزونتروبي s 2 – 3

C) انضغاط لثبوت درجة الحرارة 3– 4

d) انضغاط بثبوت الايزونتروبـــي s 4 – 1



الشكل 2.1 : دورة كارنو ذات الاتجاه نحو اليمين.

من أجل التمدد بثبوت درجة الحرارة 1 – 2 فإن:

$$T_1 = \text{const},\ p_1 v_1 = p_2 v_2 \qquad (29.1)$$

حيث: p الضغط [Pa]

v الحجم النوعي [m³/kg].

وبالنسبة للحرارة المضافة Q_s وعمل التمدد W_{12} فإنه:

$$Q_s = m \cdot T_1 (s_2 - s_1) \quad [J] \qquad (30.1)$$

$$W_{12} = m\,R\,T_1 \ln (p_1 / p_2) = m\,R\,T_1 \ln (v_2 / v_1) \quad [J] \qquad (31.1)$$

حيث: T درجة حرارة الغاز

s الانتروبـــي النوعي للغاز [J/kg K]

R ثابت الغاز [J/kg K]

p الضغط [Pa]

v الحجم النوعي للغاز [m³/kg].

الدليلان 1 و 2 يشيران إلى حالة الغاز قبل وبعد التمدد الإيزونتزمي.

أما من أجل التمدد الايزونتربـــي 2 – 3 فنطبق على عوامل الحالة عند النقطة 2 قبل التمدد (حيث يكون الضغط p_2، درجة الحرارة T_1، الحجم النوعي v_2) وعند 3 بعد التمدد (حيث تسود p_3، T_2، v_3) العلاقات التالية:

$$p_2 v_2^{k} = p_3 v_3^{k} \text{ ، } T_1 v_2^{k-1} = T_2 v_3^{k-1} \text{ و } T_1 / p_2^{(k-1)/k} = T_2 / p_3^{(k-1)/k} \quad (32.1)$$

وينتج عمل التمدد W_{23}:

$$W_{23} = m\, c_v\, (T_1 - T_2) = [\, k / (\, k - 1)]\, m\, R\, (T_1 - T_2)$$

$$= [\, k / (k - 1)]\, (\, p_2 V_2 - p_3 V_3) \quad [J] \quad (33.1)$$

من أجل الانضغاط الإيزونتري 3 – 4:

$$p_3\, v_3 = p_4\, v_4 \text{ و } T_2 = \text{const} \quad (34.1)$$

أما الحرارة المطروحة Q_R وعمل الانضغاط W_{34} فيحسبان كما يلي:

$$Q_R = m\, T_2\, (s_2 - s_1) \quad [J] \quad (35.1)$$

$$W_{34} = m\, R\, T_2 \ln (\, p_4 / p_3) = m\, R\, T_2 \ln (v_3 / v_4) \quad [J] \quad (36.1)$$

وللانضغاظ الايزرونتربـــي 1 – 4:

$$p_4 v_4^{k} = p_1 v_1^{k} \text{ ، } T_2 v_4^{k-1} = T_1 v_1^{k-1} \text{ و } T_2 / p_4^{(k-1)/k} = T_1 / p_1^{(k-1)/k} \quad (37.1)$$

عمل الانضغاط W_{41}:

$$W_{41} = m\, c_v\, (T_1 - T_2) = [k/ (k-1)]\, m\, R\, (T_1 - T_2) = [k/ (k-1)]\, (p_1 v_1 - p_4 v_4) \quad [J] \quad (38.1)$$

أما الحرارة المفيدة المتحولة فهي:

$$Q_u = Q_s - Q_R = m(T_1 - T_2)\, (s_2 - s_1) \quad [J] \quad (39.1)$$

عمل التمدد وعمل الانضغاط لدورة العمل:

$$W_{comp} = W_{34} + W_{41} \; [J] \text{ و } W_{exp} = W_{12} + W_{23} \quad (40.1)$$

الفرق بين W_{exp} و W_{comp} هو العمل المفيد لدورة العمل:

$$W_u = m\, R\, (T_2 - T_1) \ln (p_1/p_2) = m\, R\, (T_1 - T_2) \ln (v_2/v_1) \quad [J] \quad (41.1)$$

والعمل المفيد W_u لدورة العمل مساوٍ للحرارة المفيدة Q_u.

المردود الحراري لدورة كارنو

يُعبرً عن جودة تحوّل الحرارة إلى عمل عن طريق المردود الحراري للدورة، وهو نسبة العمل المفيد W_u إلى الحرارة المضافة Q_s، ويمكن كتابة مردود كارنو بالشكل:

$$\eta_{th,c} = W_u / Q_s = 1 - Q_R / Q_s = 1 - T_2 / T_1 \quad (42.1)$$

تزداد قيمة $\eta_{th,c}$ بارتفاع درجة الحرارة T_1 للطاقة الحرارية المقدمة للجملة وبانخفاض درجة الحرارة T_2 لكمية الحرارة المطروحة من الجملة.

إذاً: تصلح دورة كارنو كعملية مثالية للمقارنة وذلك في الآلات الحرارية، وهي تملك المردود الحراري النظري الأقصى في مجال مُعطى لدرجات الحرارة يقع بين T_1 وT_2.

مثال 4.1

ما هو المردود الحراري لدورة كارنو في المجال الحراري $T_1 = 1800$ K و $T_2 = 300$ K

الحل:

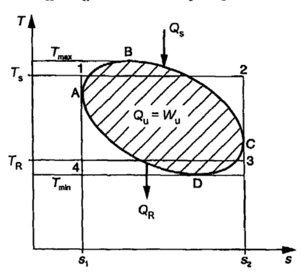
المردود الحراري لدورة كارنو

$$\eta_{th,c} = 1 - T_2 / T_1 = 1 - 300 / 1800 = 0.833$$

الاستعاضة عن دورة ما بدورة كارنو

يمكن الاستعاضة عن أية دورة تستخدم لتحويل الحرارة إلى عمل (كتلك المبينة في الشكل 3.1 على المخطط T – s) بدورة كارنو 1234 تحوي نفس عمليتي تغير الانتروبي ونفس عمليتي إضافة وطرح الحرارة (Q_s، Q_R). أما درجتا الحرارة الوسطيتان T_s، T_B لعملية ABCD فهي تحسب كما يلي:

$$T_R = Q_R / m\,\Delta S \ \ [\mathrm{K}] \text{،} \ T_s = Q_s / m\,\Delta S \quad (43.1)$$



الشكل 3.1 : الاستعاضة عن دورة عمل ما بدورة كارنو.

إن المردود الحراري لدورة عمل ما مساوٍ للمردود الحراري لدورة كارنو من أجل الدورة ABCD.

$$\eta_{th,ABCD} = 1 - T_R / T_S \qquad (44.1)$$

بما أن T_s أخفض من T_{max} وT_R أعلى من T_{min} (درجة الحرارة الأعظمية والأصغرية للدورة ABCD) فإن $\eta_{th,ABCD}$ أدنى من المردود الحراري لدورة كارنو التي تقع بين الدرجتين T_{max} و T_{min}. من لمعادلة (44.1) ينتج المبدأ الترموديناميكي لتحسين الكسب (المردود) لأية آلة حرارية.

لزيادة المردود الحراري لآلة حرارية يجب رفع درجة الحرارة الوسطية للعملية التي تتم عندها إضافة الحرارة وتخفيض درجة الحرارة الوسطية للعملية التي يتم عندها طرح الحرارة .

4.1 الجريان والخنق

الجريان عبر فوهة

تستخدم الفوهات لتسريع جريان غاز أو بخار كما هو الحال في العنفات مثلاً. في الفوهة المدببة (المتناقصة المقطع) كما في الشكل (a4.1) يحدث تمدد كظيم للغاز أو البخار. بإهمال السرعة عند الدخول V_1 يمكن حساب سرعة الخروج للغاز أو البخار كما يلي:

$$w_2 = \sqrt{2\Delta h} \quad [m/s] \qquad (45.1)$$

حيث: Δh هبوط الإنتالـبي في الفوهة [J/kg]

من أجل الغازات المثالية فإن $\Delta h = c_p . \Delta T$ ولذلك

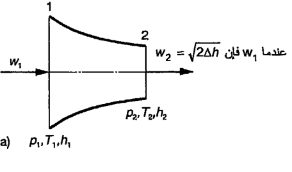
$$w_2 = \sqrt{2c_p(T_1 - T_2)} = \sqrt{2[k/(k-1)]\,R\,(T_1 - T_2)}$$
$$= \sqrt{2[k/(k-1)]\,R\,T_1\left[1-(p_2/p_1)^{k-1/k}\right]} \qquad (46.1)$$

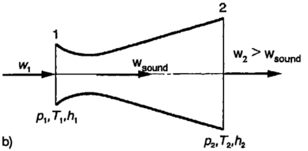
حيث: c_p السعة الحرارية للغاز عند ثبوت الضغط [J/kgK]

T_1، T_2 درجتا الحرارة قبل وبعد الفوهة [K]

k أسس التحول الايزونتروبـي

R ثابت الغاز [J/Kg K]





الشكل 4.1 : الفوهات (a) فوهة بسيطة، (b) فوهة لافال Laval، 1 مقطع الدخول، 2 مقطع الخروج.

في فوهة لافال Laval-Nozzle المبينة في الشكل (b4.1) المؤلفة من جزء متناقص المقطع وجزء آخر متزايد المقطع يتم الوصول إلى سرعة تفوق سرعة الصوت. عند المقطع الأصغري للفوهة هذه وعند درجة حرارة معينة T يتم الوصول إلى سرعة الصوت:

$$w_{sound} = \sqrt{kRT} \tag{47.1}$$

ويجري حساب سرعة الخروج v_2 عن طريق العلاقة 1-45 أو 1-47.

مثال 5.1

يبلغ هبوط الإنتالبـــي في فوهة لافال لمرحلة في عنفة بخارية 180 kJ/kg، ما هي سرعة خروج البخار من هذه الفوهة؟

الحل:

سرعة خروج البخار: $w = \sqrt{2\,\Delta h} = \sqrt{2.1.8.10^5\,\text{J/kg}} = 600\ m/s$

عملية الخنق

هي عملية تمدد عكوس للغاز أو البخار عن طريق مروره عبر عائق (حاجز، صمام، أنبوب متناقص المقطع) ويرافق ذلك هبوط للضغط. عند خنق الغازات المثالية يبقى كل من الانتالبـــي ودرجة الحرارة ثابتتين أي أن:

$$h_1 = h_2 \text{ و } T_1 = T_2 \tag{48.1}$$

عند خنق بخار الماء يبقى الانتالبي ثابتاً، أما درجة الحرارة فإنها تهبط، أي:

$$h_1 = h_2 \text{ و } t_2 < t_1 \tag{49.1}$$

تستخدم صمامات الخنق لتخفيض ضغط وسيط ما مثل بخار الماء.

مثال 6.1

ما هي درجة الحرارة للبخار بعد صمام خنق عندما تكون مواصفاته قبل الصمام $p_1 = 2\text{Mpa}$، $t_1 = 340°\text{C}$ وبعد الصمام $p_2 = 0.8$ bar؟

الحل:

انتالبـــي البخار الذي يـــبقى ثابتاً بعد الخنق هو $h_1 = 3100$ kJ/kg (وذلك عند $p_1 = 2$ MPa، $t_1 = 340°\text{C}$). من مخطط h-s للبخار ومن أجل عملية ثابتة الانتالبـــي وعند الضغط 0.8 bar يمكن استنتاج درجة الحرارة $t_2 = 312°\text{C}$.

5.1 انتقال الحرارة في المعدات الحرارية

1.5.1 التوصيل الحراري

جدار مستوٍ

يتم انتقال الحرارة بشكل عام عن طريق: التوصيل، الحمل، الإشعاع. وينشأ هذا بفعل فرق درجات الحرارة في الجسم أو المائع، حيث أن الحرارة تنتقل من الموقع ذي درجة الحرارة الأعلى إلى الموقع ذي درجة الحرارة الأخفض.

يُوصف تغير درجة الحرارة في حيز معين أو جسم عن طريق حقل درجة الحرارة الأحادي أو الثنائي أو الثلاثي الأبعاد، ويُعطى تغير درجة الحرارة المكافئ بدلالة "تدرج درجة الحرارة" [gradient]. يكون هناك حقل درجة حرارة مستقر عندما تكون درجة الحرارة غير مرتبطة بالزمن.

عند انتقال الحرارة بالتوصيل تحدث حركة انتقالية للجزيئات في الغازات والسوائل واهتزاز حواجز ودوران للذرات في الأجسام الصلبة. في المعادن تشارك الالكترونات في توصيل الحرارة.

يُحسب التيار (التدفق) الحراري في جدارٍ مستوٍ وحيد الطبقة كما يلي (الشكل a5.1):

(50.1)	$Q = A (\lambda / \delta) (t_1 - t_2) = A (t_1 - t_2) / R$ [W]

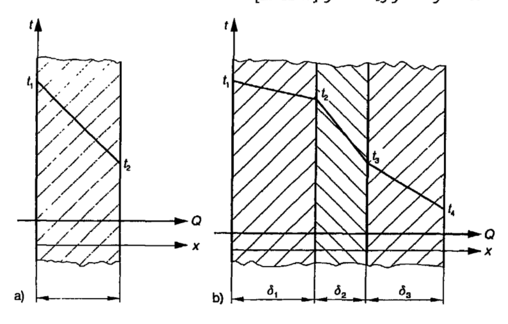
حيث: A سطح الجدار [m²]

λ عامل التوصيل الحراري للجدار [W/m K]

δ سماكة الجدار

t_1 و t_2 درجة حرارة السطوح الخارجية للجدار [°C]

R المقاومة الحرارية للجدار [m² K/W].



الشكل 5.1 :(a) التوصيل الحراري لجدار مستو أحادي الطبقة، (b) التوصيل الحراري لجدار مستو متعدد الطبقات

أما المقاومة الحرارية للجدار فتحسب كما يلي:

$$R = \delta / \lambda \quad [m^2 K/W] \qquad (51.1)$$

وكثافة التيار الحرراي:

$$q = (t_1 - t_2) / R \quad [W/m^2] \qquad (52.1)$$

جدار متعدد الطبقات

يتألف الجدار في كثير من الأحيان من عدة مواد. يمثل الشكل (b5.1) جداراً مستوياً ثلاثي الطبقات. سماكات هذه الطبقات δ_1 وδ_2 وδ_3، درجة حرارة السطح الداخلي t_1 و t_4. إذا كانت المقاومة الحرارية لطبقة الجدار، هي $R_i = (\delta / \lambda)_i$ فإن كثافة التيار الحراري q تحسب كما يلي:

(53.1) $$q = (t_1 - t_2) / R_1 = (t_2 - t_3) / R_2 = (t_3 - t_4) / R_3 = (t_1 - t_4) / (R_1 + R_2 + R_3)$$

أما درجات الحرارة عند السطوح الحدية للطبقات المختلفة للجدار:

(54.1) $$t_3 = t_1 - q\,(R_1 + R_2) = t_4 + q\,R_3 \text{ و } t_2 = t_1 - q\,R_1$$

مثال 7.1

يتألف جدار مرجل من طين حراري بسماكة 300 mm وطبقة عازلة من خبث الصوف سماكتها 120 mm. مساحة سطح الجدار 20 m^2 . ما هي قيمة التيار الحراري ودرجة الحرارة بين طبقتين درجتا حرارتهما $t_1 = 400°C$ و$t_3 = 50°C$؟ عامل التوصيل الحراري للطين الحراري W/mK1 ولخبث الصوف 0.05 W/mK.

الحل:

1. المقاومة الحرارية للطين الحراري:

$$R_1 = (\delta / \lambda)_1 = (0.3 / 1) = 0.3 \text{ m}^2\text{ K/W}$$

المقاومة الحرارية لخبث الصوف:

$$R_2 = (\delta / \lambda)_2 = (0.12 / 0.05) = 2.4 \text{ m}^2\text{ K/W}$$

2. التيار الحراري:

$$Q = (t_1 - t_3)\, A / (R_1 + R_2)$$
$$= (400 - 50)\text{ K} \times 20\text{ m}^2 / (0.3 + 2.4)\text{ m}^2\text{ K/W} = 2592.6\text{ W}$$

3. درجة الحرارة بين طبقة الطين الحراري وعازل خبث الصوف:

$$t_2 = t_1 - (Q / A)\, R_1 = 400 - (2592.6\text{ W} / 20\text{ m}^2)\; 0.3\text{ m}^2\text{ K/W} = 361.1.°\text{C}$$

جدار أنبوبـــي

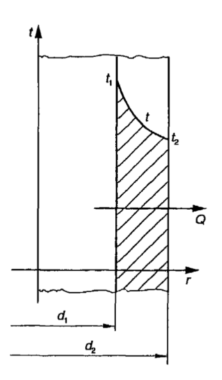
يُحسب التيار الحراري لأنبوب جداره رقيق وطوله l أكبر بكثير من سماكته δ كما يلي:

(55.1) $$Q = l\,(t_1 - t_2) / R_1 \;\; [\text{W}]$$

حيث: t_1 درجة حرارة الجدار الداخلي وt_2 للجدار الخارجي. R_1 المقاومة الحرارية بالنسبة لـــ 1 m من طول الأنبوب:

(56.1) $$R_1 = (1 / 2\pi\,\lambda)\,\ln\,(d_2 / d_1) \;\; [\text{m K/W}]$$

حيث: d_1 القطر الداخلي، d_2 القطر الخارجي [m].



الشكل 6.1: التوصيل الحراري في جدار أسطوانـــي.

وبالتالي تصبح العلاقة السابقة بالشكل:

$$Q = l\,(t_1 - t_2) / [(1 / 2\pi\,\lambda)\ \text{In}\ (d_2/d_1)] \quad [\text{w}] \qquad (57.1)$$

2.5.1 انتقال الحرارة بالحمل

معادلة نيوتون

تنتقل الحرارة بالحمل بفعل تلامس مائع حارٍ مع جسم صلب (جدار، صحيفة، أنبوب) كما في الشكل (7.1). وهناك نوعان من الحمل هما الحمل الطبيعي (الحر) والحمل القسري.

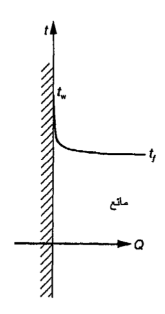
يُحسب التيار الحراري بفعل الحمل من معادلة نيوتون:

$$Q = \alpha\,(t_w - t_f)\,A \quad [\text{W}] \qquad (58.1)$$

حيث α عامل انتقال الحرارة $[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$

t_w درجة حرارة الجدار، t_f درجة حرارة المائع [°C]

A مساحة السطح $[\text{m}^2]$.



الشكل 7.1 : انتقال الحرارة بالحمل.

يرتبط انتقال الحرارة بعامل انتقال الحرارة α الذي يتعلق بدوره بفرق درجات الحرارة بين الجسم الصلب والمائع، وبنوع المائع ومواصفاته، وبشكل الجسم وحجمه ووضعه. لهذه العلاقات طبيعة معقدة لا يمكن دراستها إلا عن طريق اختبارات تجريبية ووضعها على شكل معادلات لا بعدية.

الأرقام اللابعدية

يتم حساب انتقال الحرارة بالحمل عن طريق معادلات تجريبية تتضمن الأرقام اللا بعدية التالية:

رقم نوسيل $$Nu = \alpha L / \lambda \qquad (59.1)$$

رقم رينولدز $$Re = w L / \nu \qquad (60.1)$$

رقم برانتل $$Pr = \nu / a = \mu c_p / \lambda \qquad (61.1)$$

رقم غراس هوف $$Gr = (g L^3 / \nu^2) \beta \Delta T \qquad (62.1)$$

رقم ريليه $$Ra = Gr\, Pr = g \beta \Delta T L^3 / (\nu a) \qquad (63.1)$$

حيث: α عامل انتقال الحرارة [W/(m²K)]

L الطول المميز (مثلاً قطر انبوب d) [m]

λ قابلية المائع لتوصيل الحرارة (الناقلية الحرارية) [W/(m K)]

w سرعة الجريان [m/s]

ν اللزوجة التحريكية للمائع [m^2/s]

a النفوذية الحرارية للمائع [m^2/s]

μ اللزوجة الديناميكية للمائع [Pa.s]

c_p السعة الحرارية بثبوت الضغط [J/kgK]

g التسارع الأرضي (9.81m/s2) [m/s^2]

β عامل التمدد الحجمي للمائع [1/k]

ΔT فرق درجات الحرارة [K]

يمكن الحصول على القيم المميزة للمائع (الكثافة ρ، عامل توصيل الحرارة λ، السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط، اللزوجة الديناميكية μ أو التحريكية ν) من جداول خاصة وذلك عند درجات حرارة وسطية للمائع.

يُحسَب عامل انتقال الحرارة كما يلي:

$$\alpha = Nu\,\lambda / L \quad [W/(m^2\,K)] \tag{64.1}$$

انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي

ينشأ الحمل الطبيعي في المائع بفعل قوة الرفع التي يسببها فرق الكثافة بين الجزئين الساخن والبارد من المائع بملامسة السطح الذي يعطيه حرارة (سطح الجسم الصلب) والذي يتمتع بدرجة حرارة أعلى، وبسبب ذلك يصبح أخفّ وينـــزاح نحو الأعلى، وهكذا يحدث انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي.

من أجل الحمل الطبيعي تستخدم العلاقة التالية:

$$Nu = m\,R_\alpha^n \tag{65.1}$$

حيث: L الطول المميز المستخدم في حساب الأرقام اللابعدية في المعادلة (65.1)

α عامل انتقال الحرارة بحسب المعادلة (64.1)

h الارتفاع في حالة الأنابيب الشاقولية أو الصفائح

d القطر في حالة الكرات والأنابيب الأفقية، والأبعاد الصغيرة للصفائح الأفقية.

في حالة الصفائح الأفقية يتم ضرب قيمة α المحسوبة بالعامل (1.3 أو 0.7) وفقاً لانتقال الحرارة نحو الأعلى أو نحو الأسفل.

الجدول 2.1: العامل m والأس n للمعادلة 65.1

رقم يلية Ra	العامل m	الأس n
أقل من 500	1.18	1/8
من 500 حتى 2.10^7	0.54	¼
من 2.10^7 حتى 1.10^{13}	0.135	1/3

درجة الحرارة القياسية لحساب المقادير المذكورة هي:

$$t_m = 0.5\,(t_w + t_f)$$

وبطريقة تقريبية يمكن حساب α وفق علاقة مبسطة. فمثلاً يمكن حساب α بين أنبوب معزول (درجة حرارة الجدار t_w) والهواء (درجة حرارته t_f) بالعلاقة:

$$\alpha = 9.4 + 0.052\,(t_w - t_f) \qquad (66.1)$$

مثال 8.1

من أجل أنبوب درجة حرارة جداره $t_w = 50°C$، حوله هواء درجة حرارته $t_f = 15°C$ يُطلب حساب تيار الضياع الحراري Q_L لهذا الأنبوب إذا كان قطره الخارجي $d = 80$ mm وطوله $l = 5$m.

الحل

تُحسب α من العلاقة (66.1) كما يلي:

$$\alpha = 9.4 + 0.052\,(t_w - t_f)$$
$$= 9.4 + 0.052\,(50 - 15) = 11.22\ W/m^2K$$

وبالتالي فتيار الضياع الحراري:

$$Q_L = \pi\, d\, l\, \alpha\,(t_w - t_f)$$
$$= \pi\ 0.080\ m \times 5\ m \times 11.22\ W/m^2\,K\ (50 - 15)\ K$$
$$= 493.48\ W$$

الحمل الحراري القسري

يتحرك المائع في هذه الحالة تأثير قوة ضغط مروحة أو مضخة. في محطات توليد الطاقة يوجد هذا الحمل في حالة الجريان الداخلي ضمن الأنابيب أو الأقنية وكذلك في حالة الجريان الخارجي حول الصفائح أو الأنابيب أو حول حزم الأنابيب في المبادلات الحرارية. يكون الجريان صفائحياً أو مضطرباً وذلك تبعاً لـــ: سرعة الجريان w، أبعاد المجرى (مثلاً قطره d). اللزوجة التحريكية للمائع ν فإذا كان رقم رينولد أقل من 2320 فالجريان صفائحي وإذا كان أكبر من 10000 فالجريان كامل الاضطراب وبين القيمتين السابقتين يكون الجريان انتقالياً. تتم مراعاة المواصفات الفيزيائية للمائع عن طريق رقم برانتل.

من أجل جريان مضطرب في أنبوب أو قناة يكون:

$$Nu = 0.012\,(Re^{0.87} - 280)\,P^{0.4}\,[1 + (d / l)^{2/3}]\,(Pr / Pr_w)^{0.11} \qquad (67.1)$$

حيث: d قطر الأنبوب وl طوله [m].

المعادلة السابقة صالحة للمجال [$Pr = 1.5$ حتى 500 $Re > 2320$]

يتم اختيار (ν وλ) و Pr للمائع عند درجة حرارة وسطية للمائع t_m، أما Pr_w فتؤخذ عند درجة حرارة الجدار t_w.

هنالك قيم يمكن الاسترشاد بها لـــ α عند الحمل القسري أو الطبيعي كما يبين الجدول 3.1.

الجدول 3.1: قيم استرشادية لعامل انتقال الحرارة α

الوسيط	نوع الحمل	α [W/m^2 K]
هواء ــ غازات	حر	20-5
هواء ــ غازات	قسري	100-10
ماء	حر	1000-200
ماء	قسري	10000- 1000
ماء	غليان	15000-1500
بخار	تكاثف	15000-3000

3.5.1 انتقال الحرارة بالإشعاع

الامتصاص، الانعكاس، التحرير

يقصد بالإشعاع الحراري تلك الإشعاعات الكهرومغناطيسية التي يتراوح طول موجاتها λ بين 0.25 μm و800 μm ويتم إصدارها وامتصاصها من الأجسام الصلبة والسائلة والغازية.

عندما يصادف تيار إشعاع حراري جسماً فإنه يتم امتصاصه أو انعكاسه أو تمريره ويكون:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \qquad (68.1)$$

حيث: α نسبة الامتصاص

ρ نسبة الانعكاس

τ نسبة التمرير.

تتعلق القيم (α، ρ، τ) لجسم أسود بمادته ودرجة حرارته ونعومة سطحه الخارجي. من أجل جسم كامل السواد (أسود مطلق) يمتص الإشعاع بشكل كامل فإن درجة الامتصاص $\alpha = 1$، أما للجسم الذي تكون عاكسيته مثالية فإن $\tau = 0$ و$a + \rho = 1$.

يمكن اعتبار السطوح الخارجية للآلات رماديةً، ومن أجل الجسم الرمادي لا تتعلق درجة الامتصاص α بطول الموجات وهي أقل من 1. من أجل مواد ذات امتصاصية وتمريرية مختارة (مثل الغازات الثنائية الذرات، وبخار الماء، وثاني أكسيد الكربون) تتعلق درجة الامتصاص a_λ بطول الأمواج λ. وهي تمتص وتمرر الأشعة ذات أطوال الموجات المختلفة بشدات مختلفة.

قوانين الإشعاع

تُعرَّف شدة الإشعاع الطيفي $I_{o\lambda}$ بأنها كمية الطاقة التي يمتصها $1\ m^2$ من السطح الخارجي للجسم كل ثانية، وذلك من الموجات التي يقع طولها في المجال 1 μm. وبحسب قانون بلانك فإنه من أجل الجسم الأسود يكون $\alpha = 1$ وبالتالي:

$$I_{o\lambda} = C_1 / \lambda^5 (e^{C2/T} - 1) \quad [W/m^2\ \mu m] \qquad (69.1)$$

حيث: T درجة الحرارة [K]

λ طول الموجة [μm] $(1\mu m = 10^{-6}\ m)$

C_1 ثابت قيمته 3.7405×10^{-16} [W m²]، C_2 ثابت قيمته 0.0143879 [m K].

بحسب قانون فين (Wien) تنـــزاح شدة الإشعاع الأعظمية مع ازدياد درجة الحرارة وذلك باتجاه الموجات الأقصر. إن جداء طول الموجة λ_{max}، الذي تبلغ شدة الإشعاع لجسم أسود عنده قيمتها الأعظمية بدرجة الحرارة T يبقى ثابتاً: $\lambda_{max} \cdot T = 2897 \times 8\ \mu m\ K$.

أما قانون شتيفان بولتزمان فيعطى كثافة تيار الإشعاع E_0 لجسم أسود عند درجة حرارة T، وهو ما يصدره الجسم من كل $1\ m^2$ في الثانية الواحدة:

$$E_o = \sigma T^4 = C_o (T / 100)^4 \quad [W / m^2] \qquad (70.1)$$

حيث: σ ثابت شتيفان ـــ بولتزمان $\sigma = 5.67\ 10^{-8}\ W/ (m^2 K^4)$

C_o عامل الإشعاع للجسم الأسود $C_o = 5.67\ W / (m^2 K^4)$.

تُعطى كثافة التيار الحراري لجسم رمادي (لآلة) بالعلاقة:

$$E = \varepsilon E_o = \varepsilon \sigma T^4 = \varepsilon C_o (T / 100)^4 = C (T / 100)^4 \quad [W/m^2] \qquad (71.1)$$

حيث: ε درجة الإصدار

$C = \varepsilon C_o$ عامل إشعاع الجسم الأسود $[W/(m^2 K^4)]$.

بحسب قانون كيرشوف فإنه للجسم الرمادي ومن أجل طول محدد للموجات تكون قيمة عامل الامتصاص α_λ مساوية (عند نفس الطول للموجات) لقيمة عامل الإصدار، وذلك عند نفس درجات الحرارة للجسم الممتص والمُصدِر. وبشكل تقريبي يمكن استخدام قيم α وε من أجل كل مجال أطوال الموجة.

التبادل الحراري بالإشعاع

إن حساب الإشعاع المتبادل بين السطوح الرمادية المتوضعة بشكل غير محدد بالنسبة لبعضها البعض عملية شديدة التعقيد، وهناك حالتان خاصتان يمكن حساب التبادل الحراري بالإشعاع فيهما، ويفترض فيهما أن السطوح مفصولة عن بعضها بوسط يمرر الإشعاع (مثل الهواء).

الحالة الأولى: التبادل بالإشعاع بين سطحين متوازيين لهما نفس المساحة $A[m^2]$ (الشكل a8.1).

يحسب تيار الإشعاع الصافي من السطح الساخن 1 إلى السطح البارد 2 من العلاقة التالية:

$$Q = A \varepsilon_{12} \sigma(T_1^4 - T_2^4) = A C_{12} [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \quad [W] \qquad (72.1)$$

أما درجة الإصدار الصافي فتحسب بالعلاقة:

وعامل الإشعاع: $\varepsilon_{12} = 1 / [(1 / \varepsilon_1) + (1 / \varepsilon_2) - 1]$

$$C_{12} = 1 / [(1 / C_1) + (1 / C_2) - (1 / C_0)] \qquad (73.1)$$

حيث: $C_1 = \varepsilon_1 C_0$ أو $C_2 = \varepsilon_2 C_0$

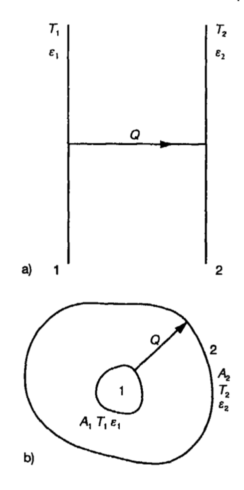
وعامل الإشعاع للسطح 1 أو 2 هو $C_o = 5.67\ W / m^2 K^4$

الحالة الثانية: التبادل بالإشعاع بين سطح محدب وغلافه (الشكل b.8.1)

يحسب تيار الإشعاع الصافي من الجسم 1 إلى الغلاف 2 من العلاقة التالية:

$$Q = \varepsilon_{12} A_1 \sigma(T_1^4 - T_2^4) = C_{12} A_1 [(T_1 / 100)^4 - (T_2 / 100)^4] \quad [W] \qquad (74.1)$$

حيث: A_1 مساحة سطح الجسم 1.



الشكل 8.1 : التبادل الحراري بالإشعاع بين a) السطوح المستوية المتوازية b) جسم وغلافه.

أما درجة الإصدار الفعال ε_{12} أو عامل الإشعاع C_{12} فتحسب من العلاقة التالية:

$$\varepsilon_{12} = 1 / [1/\varepsilon_1 + (1/\varepsilon_2 - 1)(A_1/A_2)$$

$$C_{12} = 1 / [(1/C_1 + (1/C_2 - 1/C_o)(A_1/A_2)] \qquad (75.1)$$

عندما تكون المساحة A_1 أصغر بكثير من A_2 يصبح:

$$C_{12} = C_1 \text{ ، } \varepsilon_{12} = \varepsilon_1 \qquad (76.1)$$

وينتج عامل انتقال الحرارة بالإشعاع من العلاقة التالية:

$$\alpha_{rad} = Q / [A (T_2 - T_1)] \quad [W/(m^2 K)] \qquad (77.1)$$

أو

$$\alpha_{rad} = \varepsilon_{12}\, \sigma (T_2 + T_1)(T_2^2 + T_1^2) \cong 4 \varepsilon_{12}\, \sigma T_m^3 \quad [W/(m^2 K)] \qquad (78.1)$$

حيث: T_m درجة الحرارة الوسطية للمنظومة $T_m = 0.5\,(T_1 + T_2)$ [K]

مثال 9.1

يطلب حساب عامل انتقال الحرارة للتبادل الحراري بالإشعاع بين سطحين مستويـــين أحدهما درجة حرارته $T_1 = 300$ °C ودرجة إصداره $\varepsilon_1 = 0.9$ والجسم الثانـــي درجة حرارته $T_2 = 600$°C ودرجة إصداره $\varepsilon_2 = 0.8$.

الحل:

درجة الإصدار:

$$\varepsilon_{12} = 1/(1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1) = 1/(1/0.9 + 1/0.8 - 1) = 0.735$$

ومنه فعامل انتقال الحرارة بالإشعاع:

$$\alpha_{rad} = \varepsilon_{12}\, \sigma (T_1^4 - T_2^4) / (T_1 - T_2)$$
$$= 0.735 \times 5.67 \times 10^{-8} (873^4 - 573^4) / (873 - 573)$$
$$= 65.7 \text{ W}/(m^2 K)$$

4.5.1 المبادلات الحرارية

نفوذ الحرارة

عند نفوذ الحرارة عبر جدارٍ مستوٍ سماكته δ ومساحته A ولمادته عامل توصيل حراري λ، يفصل بين وسطين درجتا حرارتهما مختلفتان t_1 وt_2 فإن التيار الحراري عبر الجدار يحسب من العلاقة التالية:

$$Q = k A (t_1 - t_2) \quad [W] \tag{79.1}$$

وعامل نفوذ الحرارة k:

$$k = 1 / (1 / \alpha_1 + \delta / \lambda + 1 / \alpha_2) \quad [W/(m^2 K)] \tag{80.1}$$

حيث: α_1 و α_2 عامل انتقال الحرارة عند السطحين الداخلي والخارجي للجدار.

وتنتج درجتا حرارة سطحي الجدار:

$$t_{w1} = t_1 - Q / (A\, \alpha_1)$$

و

$$t_{w2} = t_2 + Q / (A\, \alpha_2) \tag{81.1}$$

من أجل الجدران المتعددة الطبقات يعوض عن (δ/λ) في المعادلة 80.1 بالمقدار $\sum (\delta / \lambda)$ الذي هو مجموع المقاومات الحرارية لمختلف الطبقات.

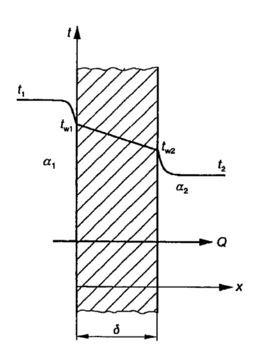
عند نفوذ الحرارة عبر جدار أسطواني (أنبوب طويل جداً) فإن التيار الحراري يحسب كما يلي:

$$Q = k_1 A_1 (t_1 - t_2) = k_m A_m (t_1 - t_2)$$

$$= k_2\, A_2 (t_1 - t_2) = k_1\, l\, (t_1 - t_2) \quad [W] \tag{82.1}$$

حيث: k_1، k_2، k_m عوامل نفوذ الحرارة عند السطح الداخلي، الخارجي، الوسطي $[W/(m^2K)]$

k عامل نفوذ الحرارة على طول الأنبوب $[W/(m\, K)]$.



الشكل 9.1 : نفوذ الحرارة عبر جدارٍ مستوٍ.

تحسب مساحة السطح الداخلي والخارجي والوسطي كما يلي:

$$A_1 = \pi d_1 l \text{ ، } A_2 = \pi d_2 l \text{ ، } A_m = \pi d_m l \quad [m^2] \qquad (83.1)$$

حيث: d_1، d_1، d_m القطر الداخلي والخارجي والوسطي للأنبوب على التوالي [m].

العلاقة بين عوامل نفوذ الحرارة السطحية والطولية هي:

$$k_1 A_1 = k_m A_m = k_2 A_2 = k_l l \qquad (84.1)$$

عامل نفوذ الحرارة لواحدة الطول:

$$k_l = Q / l\,(t_1 - t_2) = 1/\,(\pi\, d_1 \alpha_1) + (1/2\,\pi\,\lambda)$$

$$\text{In}\,(d_2 / d_1) + 1/\,(\pi\, d_2 \alpha_2)] \quad [W/m\,K] \qquad (85.1)$$

أما عامل نفوذ الحرارة لواحدة السطح:

$$k_m = k_l / \pi\, d_m \text{ و } k_2 = k_l / \pi\, d_2 \text{ ، } k_1 = k_l / \pi\, d_1 \qquad (86.1)$$

مثال 10.1

ما هي قيمة التيار الحراري الضائع من غازات احتراق ساخنة درجة حرارتها 400 °C عبر جدار من الطين الحراري سماكته 350 mm وعامل توصيله للحرارة 1 W/m K إلى الوسط الحراري المحيط الذي درجة حرارته 25°C؟ مساحة الجدار 20 m^2، وعامل انتقال الحرارة عند الجهة الداخلية للجدار 80 وعند الجهة الخارجية له 12 $W/m^2 K$.

الحل:

1. عامل انتقال الحرارة:

$$k = 1/(1/\alpha_1 + \delta / \lambda + 1 / \alpha_2)$$

$$= 1/\,(1/80 + 0.35/1 + 1/12) = 2.24\ W/m^2K$$

2. تيار الضياع الحراري:

$$Q = k\,A\,(t_1 - t_2)$$

$$= 2.24\ W/m^2\,K \times 20\ m^2\,(400 - 25)\ K = 16800\ W$$

المبادلات الحرارية الاسترجاعية

تستخدم في محطات تحويل الطاقة مبادلات حرارية ذات أنواع مختلفة وغالباً تستخدم الأنواع الاسترجاعية التي تأخذ شكل أنبوب مزدوج، أو حزمة أنابيب، أو على شكل صفائح. يتم في

المبادلات الاسترجاعية انتقال الحرارة من الوسيط الساخن إلى الوسيط البارد عن طريق سطح تسخين يلامس كلا المائعين (يدعى هذا السطح حامل الحرارة). كما تستخدم على نطاق ضيق المبادلات المتجددة، مثلاً في مسخنات الهواء، وفي المبادلات الحرارية من هذا النوع تستخدم كتلة للتخزين تأخذ الحرارة من المائع الساخن ثم تعطيها للمائع (الوسيط) البارد. تقسم المبادلات الحرارية الاسترجاعية بحسب وضعية الجريان إلى مبادلات ذات جريان متماثل وأخرى ذات جريان متعاكس وثالثة ذات جريان متصالب.

الاستطاعة الحرارية لمبادل حراري استرجاعي وبإهمال الضياعات الحرارية يمكن حسابها من موازنة الطاقة:

$$Q = m_1 (h_{1ent} - h_{1exit}) = m_2 (h_{2exit} - h_{2ent}) \quad [W] \qquad (87.1)$$

حيث: m التدفق الكتلي لحامل الحرارة [kg/s]

h_{ent} انتالبـــي الدخول، h_{exit} انتالبي الخروج لحامل الحرارة [J/kg]، الدليل 1 للطرف الساخن، والدليل 2 للطرف البارد في المبادلات الحرارية.

وعندما لا يحدث تغير في حالة الوسيط (تبخّر أو تكاثف) يمكننا كتابة العلاقة التالية:

$$\begin{aligned} Q &= (m\, c_p)_1 \,(t_{1,ent} - t_{1,exit}) \\ &= (m\, c_p)_2 \,(t_{2,exit} - t_{2,ent}) \end{aligned} \qquad (88.1)$$

حيث: C_p السعة الحرارية النوعية للحامل الحراري [J / kg K]

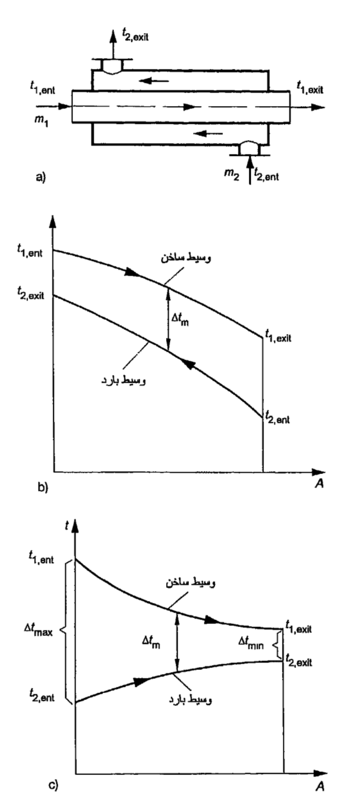
t_{ent} درجة حرارة الدخول للحامل الحراري، t_{exit} درجة حرارة الخروج للحامـــل الحراري [°C].

يُحسب فرق درجات الحرارة الوسطي اللوغارتمي كما يلي:

$$\Delta t_m = (\Delta t_{max} - \Delta t_{min}) / \ln (\Delta t_{max} / \Delta t_{min}) \qquad (89.1)$$

حيث: Δt_{max} فرق درجات الحرارة الأعظمي

Δt_{min} فرق درجات الحرارة الأصغري.



الشكل 10.1 : مبادل حراري وأنبوب مزدوج (a) مخطط مبادل حراري جريانه متعاكس (b) تغير درجة حرارة حوامل الحرارة في مبادل حراري متعاكس (c) تغير درجة حرارة حوامل الحرارة في مبادل حراري متماثل.

آ ــــ من أجل المبادل الحراري ذي الجريان المتعاكس (الشكل b10.1)

$$\Delta t_{max} = t_{1ent} - t_{2exit}$$

و
$$\Delta t_{min} = t_{1exit} - t_{2ent} \quad (90.1)$$

ب ــــ من أجل المبادل الحراري ذي الجريان المتساوي الاتجاه (c10.1)

$$\Delta t_{mex} = t_{1ent} - t_{2exit}$$

و
$$\Delta t_{min} = t_{1exit} - t_{2ent} \quad (91.1)$$

إذا كان $\Delta t_{max} / \Delta t_{min} < 1.7$ يُستخدم فرق درجات حرارة وسطي حسابي:

$$\Delta t_m = (\Delta t_{max} + \Delta t_{min}) / 2$$

ومساحة المبادل الحراري:

$$A = Q / (k \, \Delta t_m) \quad [m^2] \quad (92.1)$$

مثال 11.1

يُطلب حساب فرق درجات الحرارة الوسطي اللوغارتمي لمبادل حراري متماثل الاتجاه ولمبادل حراري متعاكس الاتجاه. درجات حرارة الدخول والخروج للحامل الحراري الساخن هي 90 و °C 50 وللحامل الحراري البارد هي 10 و °C 30.

الحل

من أجل المبادل الحراري المتماثل الاتجاه:

$$\Delta t_m = [(90 - 10) - (50 - 30)] \ln [(90 - 30) / (40 - 30)] = 43.28 \text{ K}$$

ومن أجل المبادل الحراري المتعاكس الاتجاه:

$$\Delta t_m = [(90 - 30) - (50 - 10)] \ln [(90 - 30) / (50 - 10)] = 49.33 \text{ K}$$

إن فرق درجات الحرارة الوسطي للمبادل المتعاكس الاتجاه أكبر دائماً من فرق درجات الحرارة الوسطي للمبادل المتماثل الاتجاه، ولذلك فسطح التسخين اللازم لتبادل نفس التيار الحراري يكون في المبادل المتعاكس الاتجاه أصغر.

6.1 أسس هندسة الجريان

تتألف هذه الأسس من معادلة الطاقة ومعادلة الاستمرار وقانون تغير كمية الحركة.

من أجل جريان كظيم لمائع غير قابل للانضغاط (جريان سوائل، جريان غازات مع تغير ضئيل للضغط)، وإذا لم يكن هناك ضياعات ضغط، أي بدون احتكاك، عندئذ تنص معادلة برنولي على:

$$p + p_{dyn} + \rho\, g z = \text{const} \qquad (93.1)$$

حيث: p الضغط الستاتيكي (السكوني) [Pa]

p_{dyn} الضغط الديناميكي (الحركي) [Pa]

ρ الكتلة النوعية للمائع [kg/m^3]

g التسارع الأرضي [m/s^2]

z ارتفاع المقطع عن المستوى المرجعي (مستوى المقارنة).

أما الضغط الديناميكي فيعطى بالعلاقة:

$$p_{dyn} = 0.5\, \rho\, w^2 \quad [Pa] \qquad (94.1)$$

حيث: w سرعة الجريان [m/s].

تقوم معادلة الاستمرار على قانون انحفاظ الكتلة، الذي ينص على أنه في حالة جريان مستقر (غير متغير المواصفات مع الزمن)، فإن كمية المائع [kg/s] التي تجري عند كل مقطع ثابتة. فمثلاً من أجل المقطعين 1و2:

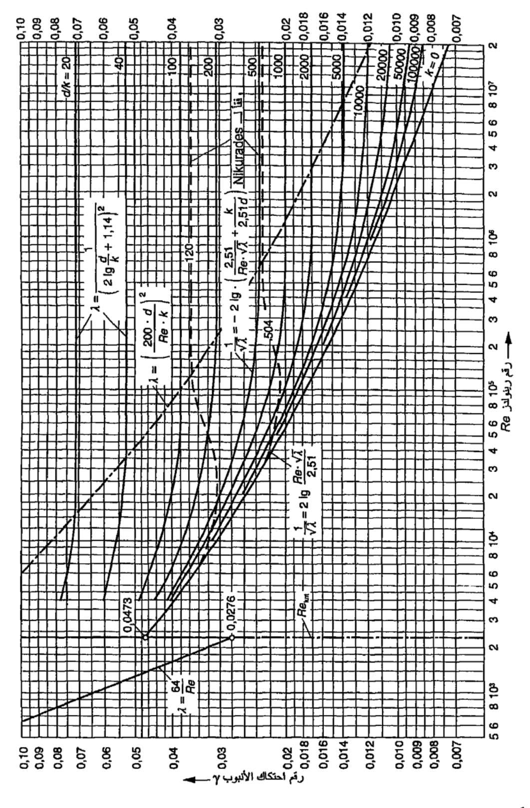
$$m = \rho_1 A_1 w_1 = \rho_2 A_2 w_2 = \text{const} \qquad (95.1)$$

من أجل الوسائط غير القابلة للانضغاط فإن $(\rho_1 = \rho_2 = \rho)$ ومن ثم فالتدفق الحجمي يبلغ:

$$V = m / \rho = A_1 w_1 = A_2 w_2 \quad [m^3/s] \qquad (96.1)$$

يتألف الضياع الإجمالي في الضغط في أنبوب من ضياع الضغط بفعل الاحتكاك Δp_{fr} وضياعات الضغط عند المقاومات المختلفة Δp_n (الضياعات الموضعية).

$$\Delta p_v = \Delta p_{fr} + \Delta p_n \quad [Pa] \qquad (97.1)$$



الشكل 11.1 : مخطط مودي [Moody - Diagramm] لحساب عامل الاحتكاك في الأنابيب.

يحسب هبوط الضغط بفعل الاحتكاك في الأنابيب المستقيمة ذات المقطع الثابت بمعرفة عامل الاحتكاك للأنبوب λ وسرعة الجريان v وقطر الأنبوب الداخلي d وطول الأنبوب L كما يلي:

$$\Delta p_{fr} = 0.5\ \lambda\ \rho\ w^2\ L / d \qquad (98.1)$$

من أجل الجريان الداخلي الصفائحي (أي عندما يكون رقم رينولدز أصغر من 2320 $Re < 2320$) يحسب عامل الاحتكاك كما يلي:

$$\lambda = 64 / Re \qquad (99.1)$$

من أجل جريان داخلي مضطرب تتعلق λ (بالإضافة إلى Re) بخشونة جدار الأنبوب k. يمكن حساب قيم عامل الاحتكاك للأنبوب λ من الجدول (4.1) الذي يتضمن علاقات الحساب اللازمة.

أما الحصول على قيمة عامل الاحتكاك λ فيتم من مخطط مودي (Moody) المبين في الشكل (11.1).

وللأقنية التي مقطعها غير دائري (مساحة مقطعها A ومحيطها U) يستخدم القطر المكافئ.

$$d_{eq} = 4\ A / U \qquad (100.1)$$

حيث: $d_{eq} = D - d$ من أجل الحلقة التي قطرها الخارجي D والداخلي d

$d_{eq} = 2a\ .\ b / (a + b)$ من أجل المستطيل الذي بعداه $a \times b$.

لحساب هبوط الضغط في المقاومات الموضعية (تغير المقطع، تفرع أنبوب، الصمامات...الخ) تطبق العلاقة التالية:

$$\Delta p_e = \xi\ \rho\ w^2 / 2 \qquad (101.1)$$

حيث: ξ عامل الضياع (المقاومة).

إذا كانت هناك عدة مقاومات تقع خلف بعضها البعض فإن هبوط الضغط الإجمالي (عند ثبات سرعة الجريان):

$$\Delta p_{tot} = (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + ...)\ \rho\ w^2 / 2 \quad [Pa] \qquad (102.1)$$

يمكن الحصول على عوامل الضياعات ξ للمقاومات الموضعية (من أجل تغير منتظم أو غير منتظم للمقطع، الأكواع، صمامات التحكم أو الإغلاق، صمامات الخنق، السكورة) من المراجع الاختصاصية [2.1].

الجدول 4.1: علاقات عامل احتكاك الأنبوب λ عند جريان داخلي مضطرب

مجال رقم رينولدز	المعادلة	العلاقة حسب
	الأنابيب الهيدروليكية الناعمة ($Rek/d < 65$)	
$2320 < Re < 10^5$	$\lambda = 0.3164 / Re^{0.25}$	Blasius
$10^5 < Re < 3.10^6$	$1/\sqrt{\lambda} = 2 \lg (Re\sqrt{\lambda} / 2.51)$	Prandtl/van Karman
	الأنابيب الهيدروليكية الخشنة	
$Re\, k / d > 1300$	$\lambda = 2 1 g\ (3.715\ d / k)$	Nikuradse
$65 < Re\, k / d < 1300$	$1/\sqrt{\lambda} = -2 \lg [3.715\ d / k + 2.51 /(Re\sqrt{\lambda})]$	Colebrook

مثال 12.1

ما هو هبوط الضغط في أنبوب ماء ناعم هيدروليكياً قطره 30 mm وطوله 20 m عند سرعة جريان 1 m/s. درجة حرارة الماء 20°C.

الحل

1. عند درجة الحرارة 20°C فإنه يمكن تحديد مواصفات الماء من الجدول A.1:

الكتلة النوعية: $\rho = 998.2$ kg / m³، اللزوجة التحريكية $\nu = 1.004 \times 10^{-6}$ m²/s.

2. رقم رينولدز $Re = w\, d /\nu$ وبالتعويض

$Re = 1$ m / s × 0.03 m / 1.004 × 10^{-6} m² / s = 29 880.5.

3. عامل الاحتكاك $\lambda = 0.3164 / Re^{0.25}$ وبالتعويض

$\lambda = 0.3164 / Re^{0.25} = 0.3164 / 29\,880.5^{0.25} = 0.024$

4. هبوط الضغط: $\Delta P = \lambda\ (L / d)\ \rho\, v^2 / 2$ بالتعويض:

$\Delta P = 0.024$ (20 m / 0.03 m) 998.2 kg / m³ (1 m / s)² / 2 = 7986 Pa

2 الوقود والاحتراق

1.2 التركيب والقيمة الحرارية

تركيب الوقود الصلب والسائل

يحتوي الوقود أجزاءً قابلة للاحتراق وأخرى غير قابلة للاحتراق. الأجزاء القابلة للاحتراق هي الكربون والهيدروجين والكبريت، أما الأجزاء غير القابلة للاحتراق فهي الآزوت (نتروجين) والرماد والماء. من أنواع الوقود الصلب هناك الفحم الحجري والفحم البنـــي والخشب والتورف (فحم المستنقعات)، بالإضافة إلى النفايات القابلة للاحتراق.

عند تسخين وقود صلب إلى درجة الحرارة 900°C تنطلق المركبات الطيارة قبل بدء الاحتراق. تتراوح نسبة الأجزاء الطيارة في الفحم الحجري بين 10 % (للانتراسيت) و 28 إلى 50 % للفحم الذي يحوي نسبة عالية من البيتومين (القار).

تستخدم لمحطات الطاقة أنواع سائلة من الوقود هي نواتج النفط مثل الوقود الثقيل (الفيول) أو الخفيف (المازوت). يتألف الوقود الثقيل من مزيج من الفحوم الهيدروجينية مع روابط أكاسيد الآزوت والكبريت، وهو ذو لزوجة عالية عند درجة حرارة الغرفة، ولذا يجب تسخينه (حتـــى درجة الحرارة 80 إلى 140 °C) ثم تذريره (في الحراق بمساعدة الهواء أو البخار) قبل إحراقه. أما الوقود الخفيف فهو يحترق عملياً بدون بقايا ويستخدم للإقلاع ولتنشيط الاحتراق في العنفات الغازية.

يُعطى تركيب الوقود الصلب أو السائل بناءً على التحليل العنصري كما يلي:

$$C + H + S + N + O + A + W = 100\,\% \qquad (1.2)$$

وتـــمثل رموز هذه المعادلة: C النسبة الوزنية للكربون في الوقود [%]، H للهيدروجين، S للكبريت، N للآزوت، A للرماد، W للماء.

يعتبر الرماد والماء عناصر عديمة الفائدة في الوقود، وتبلغ نسبة الرماد في الفحم البنـــي 3 إلى % 8، أما نسبة الـــماء فهي 45 – 60 %، وفي قوالب الفحم تبلغ نسبة الرماد 5 إلى 11 % والماء حتى 15 %. القيمة الوسطية للرماد (A) في الفحم الحجري 8 – 10 %. في الانتراسيت نسبة الرماد 3 – 6 % ونسبة الماء 1 حتى 3 %، ما عدا في فحم الكوك فهي بين 3 – 8 %. يؤثر تركيب الرماد ومواصفاته (وخاصة ما يسمى درجة حرارة ذوبان الرماد وتحوله إلى خبث) على اختيار نوع الحراق وطريقة الإحراق وكذلك على درجة حرارة حجرة الاحتراق عند مخرج الغازات.

من أجل وقود جاف (خالٍ من الماء) تصلح العلاقة التالية:

$$C' + H' + S' + O' + N' + A' = 100\ \% \qquad (2.2)$$

وللوقود الخالي من الماء والرماد:

$$C'' + H'' + S'' + O'' + N'' = 100\ \% \qquad (3.2)$$

يمكن حساب النسبة المئوية لمركبات المادة الجافة (الخالية من الماء) أو الخالية من الرماد من التحليل العنصري لهذه المادة كما يلي، فمثلاً من أجل محتوى الوقود من الفحم:

$$C' = \frac{C}{100 - W} \quad \text{أو} \quad C'' = \frac{C}{100 - A - W} \qquad (4.2)$$

القيمة الحرارية الدنيا والعليا للوقود

القيمة الحرارية هي كمية الحرارة التي تتحرر (تنطلق) عند احتراق مركبات الوقود بشكل كامل. وتُنسَب هذه القيمة إلى 1 Kg من أجل الوقود الصلب والسائل، وإلى 1 m^3 من أجل الوقود الغازي. ويمكن التمييز بين قيمة حرارية عليا ودنيا للوقود. تحسب القيمة الحرارية الدنيا لوقود صلب أو سائل وفق المعادلة التقريبية التالية:

$$LCV = 34.8\ C + 93.9\ H + 10.46\ S + 6.28\ N - 10.80\ O - 2.5\ W\,[MJ/kg] \qquad (5.2)$$

حيث: C، H، S، N، O،W نسبة كتلة العناصر المذكورة في الوقود [kg/kg].

من أجل مشتقات النفط تحسب القيمة الحرارية الدنيا كما يلي:

$$LCV = 33.15\ C + 94.1\ H + 10.46\ (S - O)\quad [MJ/kg] \qquad (6.2)$$

القيمة الحرارية العليا للوقود HCV أكبر من الدنيا بمقدار انتالبـــي التبخر لبخار الماء الذي يتشكل باحتراق الهيدروجين ويتبخر الماء الموجود في الوقود. لا يمكن استخدام القيمة الحرارية العليا

للوقود إلاّ عندما يحدث تكاثف لبخار الماء الموجود في غازات الاحتراق ضمن المرجل، أي عندما تُبرَّد الغازات إلى ما دون درجة حرارة تكاثف بخار الماء.

هناك علاقة بين LCV و HCV للوقود الصلب والسائل هي:

$$HCV = LCV + h_{eva}\, m_{H_2O} = LCV + 2.5\,(9\,H + W) \quad [MJ/kg] \qquad (7.2)$$

حيث: H، W محتوى الوقود من الهيدروجين والماء [kg/kg]

h_{eva} الانتالبـــي النوعي لتبخر الماء (2.5 MJ/kg عند الدرجة 0 °C و 1 bar)

m_{H_2O} كمية بخار الماء لكل 1kg وقود [kg/kg].

يتضمن الجدول (1.2) معطيات عن تركيب الوقود الصلب وقيمته الحرارية، بالإضافة إلى القيم النظرية لكمية الهواء اللازم للاحتراق وكمية غازات الاحتراق الجافة والرطبة ومحتوى هذه الغازات من بخار الماء و CO_2 (القيمة الأعظمية).

الجدول 1.2: تركيب الوقود الصلب، قيمته الحرارية الدنيا LCV، كمية الهواء الصغرى اللازمة للاحتراق A_{min}، حجم غازات الاحتراق الأصغرية الناتجة الرطبة $V_{G,min}$ و CO_{2max}.

الوقـود	التركيب الوزني بالـ % C	H	O	N	S	A	W	LCV kJ/kg	A_{min} m^3/kg	$V_{G,min}$ i.N.	CO_{2max} كنسبة حجمية
فحم الكوك	86	0,3		1,5	0,7	12	1,5	29 300	7,7	7,7	20,7
فحم الكوك											
من منطقة الروهر وآخن	73–83	3,4–5,3	1,8–6,5	1,1	0,9	4–7	3–5	30 140–33 070	7,7–8,3	8,2–8,6	18,3–18,9
من منطقة بلاد السار	70–78	4,7–5,2	5,4–12,5	1,2	0,6	3–8	3–5	28 050–31 400	7,9	8,3	18,7
الفحم البني											
من منطقة بلاد الراين	25–32	2	9–12	0,3	0,2	3	50–60	7 530–10 460	2,4–3,0	2,4–3,8	19,8
من منطقة اللاوسيتز	26,6	2,4	12,4	0,4	0,2	3	55	9 630	2,6	3,5	19,5

i.N تعنـــي عند الشروط النظامية (0 °C, 1.013 bar).

الجدول 2.2: تركيب الوقود السائل، قيمته الحرارية الدنيا LCV، كمية الهواء الصغرى اللازمة للاحتراق A_{min}، حجم غازات الاحتراق الرطبة الأصغرية الناتجة $V_{G,min}$.

الوقـود	الكتلة النوعية عند درجة حرارة 20°C kg/m^3	التركيب الوزني بالـ % C	H	O + N	S	LCV kJ/kg	A_{min} m^3/kg	$V_{G,min}$ i.N.	CO_{2max} كنسبة حجمية
الوقود الثقيل	0,90–0,92	84–88	11–12	1–3	2	39 800	10,6	11,4	15,9
الوقود الخفيف	0,82–0,86	86–87	13–14	0,5	0,3	42 700	11,2	11,8	15,2
البنزين	0,72	85	15	–	–	42 700	11,5	12,3	15,0
وقود الديزل(المازوت)	0,84	86	13	0,2	0,3	41 800	11,2	11,9	15,5
زيت الفحم الحجري	1,06	89	7	3,4	0,6	37 700	9,8	9,9	18,1

i.N تعنـــي عند الشروط النظامية (0 °C, 1.013 bar).

أما الجدول (2.2) ففيه معطيات عن تركيب بعض أنواع الوقود السائل والقيمة الحرارية العليا والدنيا. يتطلب الوقود اللزج تسخيناً أولياً إلى الدرجة 80 وحتى 140 °C قبل إحراقه.

تركيب الوقود الغازي وقيمته الحرارية

من أنواع الوقود الغازي نذكر الغاز الطبيعي والصناعي (غاز المولد، غاز الفرن العالي، غاز فحم الكوك، الغاز الحيوي، غاز مطمر النفايات، والغاز الناتج عن معالجة مياه المجاري). يُعطى تركيب الوقود الغازي عادة بالنسبة الحجمية (Vol - %) لعناصر الغاز المختلفة وذلك عند الشروط النظامية (0 °C، 1.013 bar).

$$CH_4 + CO + H_2 + C_m H_n + H_2S + O_2 + CO_2 + N_2 = 100\ \% \quad (8.2)$$

يعبر التركيب ذو الصيغة C_mH_n في هذه المعادلة عن كافة الفحوم الهيدروجينية باستثناء الميتان CH_4، ويقصد بذلك الإيتان C_2H_6، البروبان C_3H_8، البوتان C_4H_{10}، الايتلين C_2H_4 والاستيلين C_2H_2...إلخ.

الجدول 3.2: تركيب الوقود الغازي، قيمته الحرارية الدنيا LCV، كمية الهواء الصغرى اللازمة للاحتراق A_{min}، حجم غازات الاحتراق الرطبة الأصغرية الناتجة، CO_{2max}.

الوقود الغازي	التركيب الحجمي بالـ % CH_4	C_mH_n	H_2	CO	CO_2	N_2	LCV kJ/m³	A_{min} m³/m³	$V_{G,min}$ i.N.	CO_{2max} كنسبة حجمية
غاز طبيعي L	82	3	–	–	1	14	31800	8,4	9,4	11,8
غاز طبيعي H	93	2	–	–	1	4	36170	9,8	10,9	12,0
غاز المولدات	2	–	15	27	7	49	5760	1,19	1,98	20,1
غاز الكوك	25	2	55	6	2	10	17370	4,26	4,97	10,1

i.N تعني عند الشروط النظامية (0 °C, 1.013 bar).

يحوي الجدول (3.2) بعض المعطيات المتعلقة بالوقود الغازي مثل التركيب، القيمة الحرارية الدنيا.

تحسب القيمة الحرارية العليا أو الدنيا للوقود الغازي بناءً على مركبات هذا الغاز كما يلي:

$$LCV = \sum r_i\ LCV_i$$

أو:

$$HCV = \sum r_i\, HCV_i \quad [MJ/m^3] \quad (9.2)$$

حيث: r_i حجم الغاز الجزئي (الذي يدخل في تركيب الوقود) [m³ لكل m³ وقود غازي جاف]

LCV_i، HCV_i القيمة الحرارية الدنيا أو العليا للغاز الجزئي [MJ/m³].

تُعطى قيم كل من *LCV* و*HCV* لأنواع الوقود في الجدول (4.2).

يستخدم الغاز الطبيعي في محطات الطاقة للإقلاع (تأمين اللهب الأولي) والدعم لتشعلات الفحم، كما يستخدم في العنفات الغازية.

الجدول 4.2: القيمة الحرارية العليا *HCV* والدنيا *LCV* لأنواع الوقود الغازي

الغاز	الصيغة الكيميائية	LCV بالـ MJ/m^3	HCV بالـ MJ/m^3
الهيدروجين	H_2	10.81	12.78
أول أوكسيد الكربون	CO	12.64	12.64
الميتان	CH_4	35.93	39.87
الاستيلين	C_2H	56.9	58.9
الإيتلين	C_2H_4	59.55	63.5
الإيتان	C_2H_6	64.5	70.45
البروبان	C_3H_8	93	101
البوتان	C_4H_{10}	123.8	134
النفط	C_6H_6	144	150.3
كبريت الهيدروجين	H_2S	28.14	30.3

الجدول (5.2) يعطي درجة حرارة الالتهاب (بدء الاحتراق) لأنواع الوقود الصلب والسائل الغازي.

الجدول 5.2: درجة حرارة الالتهاب (بدء الاحتراق) لأنواع الوقود الصلب والسائل الغازي.

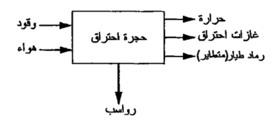
الوقود	درجة حرارة الالتهاب °C
فحم بني خام	450- 230
مسحوق (غبار) الفحم البني	170- 150
الفحم الحجري	230-210
الوقود السائل الخفيف	360
الوقود السائل الثقيل	340
الغاز الطبيعي	650-450
الهيدروجين	530

2.2 حساب الاحتراق

1.2.2 العلاقات الستيكومترية (النظرية)

الوقود الصلب والسائل

عند الاحتراق في حيّز ما تحدث تفاعلات أكسدة للأجزاء القابلة للاحتراق في الوقود مع أكسجين الهواء، والشكل (1.2) يبين الاحتراق بشكل تخطيطي.



الشكل 1.2 : مخطط عملية الاحتراق.

> *تعطي العلاقات الستيكومترية (النظرية) معادلات التفاعل من أجل احتراق كامل للوقود وتكون عملية موازنة المواد على أساس المول أو الكتل.*

سنعرض فيما يلي العلاقات الستيكومترية للأجزاء القابلة للاحتراق في وقود صلب أو سائل.

من أجل احتراق الكربون

$$C + O_2 = CO_2 + 393.5\ \text{MJ/kmol}$$

$$12\ \text{kg} + 32\ \text{kg} = 44\ \text{kg} \qquad (10.2)$$

إذاً من أجل 1 kg كربون فإن كمية الأكسجين O_2 اللازمة و CO_2 المرافقة هي:

$$8 / 3\ \text{kg}\ O_2 \text{ ،} 1\ 1/ 3\ \text{kg}\ CO_2$$

وبطريقة مشابهة فإنه عند احتراق الهيدروجين ينتج:

$$H_2 + {}^1/_2\ O_2 = H_2O\ (\text{بخار}) + 241.8\ \text{MJ / kmol}$$

$$2\ \text{kg} + 16\ \text{kg} = 18\ \text{kg} \qquad (11.2)$$

لكل 1 kg من الهيدروجين H_2 يلزم 8 kg من الأكسجين O_2، وعند الاحتراق ينشأ 9 kg بخار ماء H_2O.

عند احتراق الكبريت:

$$S + O_2 = SO_2 + 296.9\ MJ/kmol$$

$$32\ kg + 32\ kg = 64\ kg \quad (12.2)$$

لحرق 1 kg من الكبريت S يلزم 1 kg من الأوكسجين O_2 وينشأ 2 kg من SO_2.

الوقود الغازي

من أجل احتراق الأجزاء القابلة للاحتراق في وقود غازي (H_2، CO، CH_4، C_mH_n) تطبق العلاقات الستيكومترية التالية المنسوبة إلى الحجم.

من أجل غاز الهيدروجين:

$$H_2 + {}^1/_2\ O_2 = H_2O + 241.8\ MJ/kmol$$

$$1\ m^3 + {}^1/_2\ m^3 = 1\ m^3 \quad (13.2)$$

من أجل أوكسيد الكربون:

$$CO + {}^1/_2\ O_2 = CO_2 + 283.0\ MJ/kmol$$

$$1\ m^3 + {}^1/_2\ m^3 = 1\ m^3 \quad (14.2)$$

من أجل الميتان:

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$$

$$1m^3 + 2m^3 = 1m^3 + 2m^3 \quad (15.2)$$

من أجل الفحوم الهيدروجينية عموماً:

$$C_nH_m + (n + m/4)\ O_2 = n\ CO_2 + m/2\ H_2O$$

$$1\ m^3 + (n + m/4)\ m^3 = n\ m^3 + m/2\ m^3 \quad (16.3)$$

2.2.2 الهواء اللازم للاحتراق

الهواء اللازم للوقودين في الصلب والسائل

تُحسب كمية الأوكسجين الأصغرية لإحراق الوقود الصلب أو السائل بناءً على العلاقات الستيكومترية (10.2 إلى 12.2) كما يلي:

$$O_{min} = 8/3\ C + 8H + S - O \quad [kg\ O_2\ لكل\ kg\ وقود] \quad (17.2)$$

حيث: C، H، S، O محتوى الوقود من الكربون والهيدروجين والكبريت والأكسجين [kg/kg].

يبين الجدول (6.2) تركيب الهواء الجاف، حيث تم إهمال مركبات الهواء الأخرى (ثاني أوكسيد الكربون، والغازات الخاملة Ar وKr)

الجدول 6.2: تركيب الهواء الجاف

المركب	الأكسجين O_2	الآزوت N_2	نسبة N_2/O_2
النسبة المولية أو الحجمية	0.21	0.79	3.76
النسبة المئوية للحجم	21.0	79.0	3.76
النسبة المئوية للكتلة	23.2	76.8	3.31

كتلة الهواء النظرية (الأصغرية) اللازمة لاحتراق 1 kg وقود وبالـ kg هي:

$$M_{A,min} = 1/0232\ (8/3\ C + 8\ H + S - O)$$

$$= 11.49\ C + 34.48\ H + 4.31\ (S - O) \qquad (18.2)$$

الاستهلاك الأصغري للهواء أو كمية الهواء النظرية من أجل الاحتراق الكامل لوقود صلب أو سائل (m^3 هواء جاف عند الشروط النظامية أي 0 °C و1.013 bar لكل 1 kg وقود):

$$A_{min} = 8.88\ C + 26.44\ H + 33.3\ (S - O) \qquad (19.3)$$

وبمراعاة رطوبة الهواء x (kg بخار لكل kg هواء جاف) فإن كمية هواء الاحتراق:

$$A'_{min} = A_{min}\ (1 + 1.6\,x) \qquad [m^3 \text{ هواء لكل kg وقود}] \qquad (20.2)$$

يمكن اعتبار x في الصيف مساوية 0.009 kg / kg وفي الشتاء 0.002 kg / kg.

الهواء اللازم للوقود الغازي

من المعادلات 13.2 حتى 16.2 الستيكومترية، فإن الاستهلاك الأصغري للهواء عند إحراق الوقود الغازي بالـ m^3 هواء جاف عند الشروط النظامية (0 °C و1.013 bar) لكل m^3 وقود غازي يحسب من العلاقة التالية:

$$A_{min} = 4.76\ [0.5\ (H_2 + CO) + 2CH_4 + (n + m/4)\ C_nH_m + 1.5\ H_2S - O_2] \qquad (21.2)$$

حيث: H_2، CO، CH_4، C_nH_m، H_2S، O_2 محتوى الوقود من هذه المركبات [m^3/m^3].

عامل زيادة الهواء

من أجل احتراق كامل يجب أن يكون هناك زيادة في الهواء.

تبلغ كمية الهواء اللازمة فعلاً للاحتراق:

$$A = \lambda\ A_{min}\ [\text{m}^3 \text{ لكل } \text{m}^3 \text{ أو } \text{kg} \text{ وقود}] \quad (22.2)$$

حيث: λ عامل زيادة (فائض)الهواء.

يتعلق عامل زيادة الهواء بنوع الوقود وطريقة إحراقه. قيم λ هي 1.25 — 1.35 عند الإحراق بالمصبعات (هذا من أجل الحراقات الحديثة، أما من أجل القديمة فقيمة λ هي 1.7). لحراقات الفحم المسحوق تبلغ λ القيمة 1.05 — 1.15، للحراقات السيكلونية 1.1 — 1.25 إذا كان طرح الخبث في الحالة السائلة (مصهوراً)، أما لحراقات الوقود السائل والغازي فتبلغ λ القيمة 1.03 — 1.1.

مثال 1.2

يطلب تحديد القيمة الحرارية الدنيا والاستهلاك الأصغري ثم الفعلي للهواء إذا كانت قيمة عامل زيادة الهواء λ = 1.3، وذلك عن إحراق فحم بنـــي تحليله العنصري (كنسبة مئوية وزنية) كما يلي C = 32، H = 3، S = 1، N = 1، O = 8، ونسبة الرماد A = 5 والماء W = 50.

الحل

تنتج القيمة الحرارية الدنيا للوقود بحسب المعادلة (5.2) كما يلي:

$$LCV = 34.8 \times 0.32 + 93.9 \times 0.03 + 10.46$$
$$\times 0.01 + 6.28 \times 0.01 - 10.8 \times 0.\ 8 - 2.50 \times 0.50 = 12\ \text{MJ/kg}$$

أما الاستهلاك الأصغري لهواء الاحتراق فيحسب كما يلي:

$$A_{min} = 8.88\ C + 26.44\ H + 3.33\ S - 3.33\ O$$
$$= 8.88 \times 0.32 + 26.44 \times 0.03 + 3.33 \times 0.01 - 3.33 \times 0.08$$
$$= 3.4\ \text{m}^3/\text{kg}$$

والاستهلاك الفعلي لهواء الاحتراق:

$$A = \lambda\ A_{min} = 1.3 \times 3.4 = 4.42\ \text{m}^3/\text{kg}$$

3.2.2 كمية غازات الاحتراق الناتجة

كمية غازات الاحتراق الناتجة عن الوقود الصلب والسائل

تحسب كتل ثانـــي أوكسيد الكربون CO_2 وثانـــي أكسيد الكبريت SO_2 الآزوت N_2 عند احتراق كامل لوقود صلب أو سائل من العلاقات الستيكومترية (10.2 إلى 12.2). يحسب حجم

كل عنصر من المركبات الداخلة في تركيب غازات الاحتراق بالاستعانة بالكتلة. تحسب الكتلة النوعية للغازات هذه بمعرفة الكتلة المولية M والحجم المولي V_{Mol}، ويتضمن الجدول (7.2) الكتلة المولية والكتلة النوعية لمركبات الوقود وغازات الاحتراق.

من أجل الوقود الصلب والسائل تستخدم العلاقات التالية:

$$V_{CO2} = 11/3\ C\ (kg/kg)\ \rho_{CO_2} = 1.867\ C \quad \text{[m}^3\text{ من } CO_2 \text{ لكل kg1 وقود]} \qquad (23.2)$$

$$V_{SO_2} = 0.68\ S \quad \text{[m}^3\text{ من } SO_2 \text{ لكل kg1 وقود]} \qquad (24.2)$$

$$V_{N_2} = 0.8\ N + 0.79\ A_{min} \quad \text{[m}^3\text{ من } N_2 \text{ لكل kg1 وقود]} \qquad (25.2)$$

حيث: C، S، N محتوى الوقود من الكربون والكبريت والآزوت (كغ لكل كغ وقود).

الجدول 7.2: الكتلة المولية، الحجم المولي، الكتلة النوعية (عند 0°C و1.013 bar) لمركبات الوقود والهواء وغازات الاحتراق

المركب	الكتلة المولية M Kg/kmol	الحجم المولي V_{Mol} m^3/kmol	الكتلة النوعية Kg/m^3
الكربون C	12.01	–	–
الكبريت S	32.06	–	–
الأوكسجين O_2	32.00	22.39	1.429
الآزوت N_2	28.16	22.40	1.257
الهيدروجين H_2	2.016	22.43	0.090
الهواء	28.96	22.40	1.293
ثاني أكسيد الكربون CO_2	44.01	22.26	1.977
ثاني أكسيد الكبريت SO_2	64.06	21.86	2.931
بخار الماء	18.02	22.41	0.804

عندما تكون قيمة $\lambda > 1$ فإن غازات الاحتراق تحوي كمية أكبر من الآزوت والأكسجين:

$$V_{N_2} = 0.8\ N + 0.79\ \lambda\ A_{min} \quad \text{[m}^3\text{ من } N_2 \text{ لكل kg 1 وقود]} \qquad (26.2)$$

$$V_{O_2} = 0.21\ (\lambda - 1)\ A_{min} \quad \text{[m}^3\text{ من } O_2 \text{ لكل kg 1 وقود]} \qquad (27.2)$$

تحسب كمية غازات الاحتراق الجافة الناتجة عن الاحتراق كما يلي:

$$V_{G,dry} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} = 1.867\ C + 0.68\ S + 0.8\ N + 0.79\ \lambda\ A_{min} + 0.21\ (\lambda - 1)\ A_{min} \quad [m^3/kg] \qquad (28.2)$$

بسبب احتراق الهيدروجين (H) الموجود في الوقود، وبسبب الماء الموجود فيه أيضاً (W) فإن كمية بخار الماء التي توجد في غازات الاحتراق تحسب كما يلي:

$$V_{H_2O} = 11.11\,H + 1.24\,W \quad [\text{m}^3 \text{ بخار ماء لكل kg1 وقود}] \qquad (29.2)$$

وبمراعاة رطوبة الهواء x (كغ لكل كغ هواء جاف) يصبح:

$$V_{H_2O} = 11.11\,H + 1.24\,W + 1.6 \times \lambda\, A_{min} \quad [\text{m}^3 \text{ بخار ماء لكل kg1 وقود}] \qquad (30.2)$$

أما كمية غازات الاحتراق الرطبة فتحسب من العلاقة:

$$V_G = V_{G,dry} + V_{H_2O} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \qquad (31.2)$$

كميـــة غازات الاحتراق الفعلية بعد مراعاة الكمية الصغرى $V_{G,min}$ عند احتراق سيتكومتري ($\lambda = 1$) عامل زيادة الهواء λ هي:

$$V_G = V_{G,min} + (\lambda - 1)\, A_{min} \qquad (32.2)$$

عندما يكون الاحتراق غير كامل بفعل قلة الهواء ينشأ لدى احتراق الكربون إلى جانب ثانـــي أكسيد الكربون CO_2 ينشأ أيضاً أول أكسيد الكربون CO

$$C + {}^1/_2\, O_2 = CO$$

$$12\text{ Kg} + 16\text{ kg} = 28\text{ kg} \qquad (33.3)$$

مثال 2.2

من أجل فحم بنـــي تركيبه العنصري كما يلي: C = 32 %، H = 3 %، S = 1 %، N = 1 %، O = 8 % الرماد A = 5 %، الماء W = 50 %، يطلب تحديد كميات الغازات الناتجة عن الاحتراق والكمية الإجمالية الجافة والرطبة. استخدم معطيات المثال 1.2.

الحل

كمية الغازات التي تتألف منها غازات الاحتراق عندما تكون $\lambda = 1.3$:

$$V_{CO_2} = 1.867\,C = 0.592\text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{SO_2} = 0.68\,S = 0.007\text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{N_2} = 0.8\,N + 0.79\,\lambda\, A_{min}$$

$$= 0.8 \times 0.01 + 0.79 \times 1.3 \times 3.34 = 3.5\text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{O_2} = 0.21\ (\lambda - 1)\ A_{min}$$
$$= 0.21\ (1.3 - 1) = 0.214\ m^3/kg$$

الكمية الإجمالية للغازات الجافة:

$$V_{G,dry} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}$$
$$= 0.592 + 0.007 + 3.5 + 0.214 = 4.313\ m^3/kg$$

بمراعاة رطوبة الهواء x (حوالي 0.01 kg/kg) تصبح كمية بخار الماء:

$$V_{H_2O} = 11.11\ H + 1.24\ W + 1.6\ x\ A$$
$$= 11.11 \times 0.03 + 1.24 \times 0.50 + 1.6 \times 0.01 \times 4.42$$
$$= 0.333 + 0.62 + 0.068 = 1.021\ m^3 / kg$$

وتصبح كمية غازات الاحتراق الإجمالية الرطبة:

$$V_G = V_{G,dry} + V_{H_2O}$$
$$= 4.313 + 1.021 = 5.334\ m^3 / kg$$

مثال 3.2

وقود سائل ثقيل تركيبه كما يلي (C = 86 % وزناً، H = 13 %، S = 0.3 %، N = 0.4 %). يُطلب حساب حجم الهواء الأصغري اللازم للاحتراق، وكذلك حجم غازات الاحتراق الناتجة عندما تكون $\lambda = 1.1$. محتوى الهواء من الرطوبة x يبلغ 0.009 kg هواء لكل kg هواء جاف.

الحل:

1. حجم الهواء الأصغري اللازم للاحتراق:

$$A_{min} = 8.88\ C + 26.44\ H + 3.33\ (S - O)$$
$$= 8.88 \times 0.86 + 26.44 \times 0.13 + 3.33\ (0.003 - 0.003) = 11.07\ m^3/kg$$

2. الحجم الفعلي للهواء اللازم:

$$A = \lambda\ A_{min} = 1.1 \times 11.07 = 12.18\ m^3 / kg$$

3. حجم غازات الاحتراق الناتجة عندما $\lambda = 1.1$ تحسب كما يلي:

$$V_{CO_2} = 1.867\ C = 1.867 \times 0.86 = 1.606\ m^3/kg$$
$$V_{SO_2} = 0.68\ S = 0.68 \times 0.003 = 0.002\ m^3/kg$$

$$V_{N_2} = 0.8\ N_2 + 0.79\ A$$
$$= 0.8 \times 0.004 + 0.79 \times 12.18 = 9.626\ m^3/kg$$
$$V_{O_2} = 0.21\ (\lambda - 1)\ A_{min}$$
$$= 0.21\ (1.1 - 1)\ 11.07 = 0.256\ m^3/kg$$
$$V_{H_2O} = 11.11\ H + 1.6\ x\ A$$
$$= 11.11 \times 0.13 + 1.6 \times 0.009 \times 12.18 = 1.62\ m^3/kg$$

4. الحجم الإجمالي لغازات الاحتراق الرطبة هو مجموع حجوم الغازات الجزئية:

$$V_G = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{H_2O}$$
$$= 1.606 + 0.002 + 9.626 + 0.256 + 1.62 = 13.109\ m^3/kg$$

كمية غازات الاحتراق الناجمة عن احتراق الوقود الغازي

عند حصول احتراق كامل لوقود غازي خالٍ من الكبريت (عندما $\lambda > 1$) تنشأ الحجوم التالية من غازات الاحتراق (بالـ m^3 لكل m^3 وقود غازي عند الشروط النظامية):

(34.2) $$V_{CO_2} = CO_2 + CO + CH_4 + n\ C_n H_m$$

(35.2) $$V_{N_2} = N_2 + 0.79\ \lambda\ A_{min}$$

(36.2) $$V_{O_2} = 0.21\ (\lambda - 1)\ A_{min}$$

حيث: CO_2، CO، CH_4، C_nH_m، محتوى الوقود الغازي من هذه المركبات [بالـ m^3 لكل m^3 وقود غازي عند الشروط النظامية]

A_{min} الاستهلاك الأصغري للهواء من أجل الاحتراق [m^3 لكل m^3 وقود غازي]

x محتوى الرطوبة في الهواء [كغ لكل كغ هواء جاف]

λ عامل زيادة الهواء.

حجم غازات الاحتراق الجافة عند احتراق كامل:

(37.2) $$V_{G,dry} = V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} \quad [m^3/m^3]$$

حجم بخار الماء عند مراعاة رطوبة الهواء:

(38.2) $$V_{H_2O} = H_2 + 2CH_4 + m/2\ C_nH_m \quad [m^2H_2O \text{ وقود غازي } m^3]$$

أو:

(39.2) $$V_{H_2O} = H_2 + 2CH_4 + m/2\ C_nH_m + 1.6\ x\ \lambda\ A_{min} \quad [m^3/m^3]$$

أما حجم غازات الاحتراق الرطبة الإجمالية V_G فهو مجموع غازات الاحتراق الجافة $V_{G,dry}$ وبخار الماء V_{H2O}.

مثال 4.2

غاز طبيعي تركيبه كما يلي (كنسب حجمية) CH_4 = 93 %، C_2H_4 = 2 %، C_3H_8 = 3 %، CO_2 = 1 %، N_2 = 1 %، يُطلب حساب استهلاك الهواء وكذلك حجوم غازات الاحتراق الناتجة عندما $\lambda = 1.1$. رطوبة الهواء: $x =$ 0.009 kg لكل kg هواء جاف.

الحل

1. يُحسب الحجم الأصغري للهواء اللازم للاحتراق من المعادلة (21.2) كما يلي:

$$A_{min} = 4.76\ [2\ CH_4 + (n + m / 4)\ C_nH_m]$$
$$= 4.76\ [2\ CH_4 + (2 + 6/4)\ C_2H_6\ (3 + 8/4)\ C_3H_8]$$
$$= 4.76\ [2 \times 0.93 + 3.5 \times 0.02 + 5\ 0.03] = 9.9\ m^3/m^3$$

2. الاستهلاك الفعلي للهواء:

$$A = \lambda\ A_{min} = 1.1 \times 9.9 = 10.89\ m^3/m^3$$

3. حجوم غازات الاحتراق عندما $\lambda = 1.1$

$$V_{CO_2} = CO_2 + CH_4 + 2\ C_2H_6 + 3\ C_3H_8$$
$$= 0.01 + 0.93 + 2\ 0.02 + 30.03 = 1.07\ m^3/m^3$$

$$V_{N_2} = N_2 + 0.79\ A$$
$$= 0.01 + 0.79 \times 10.89 = 8.61\ m^3/m^3$$

$$V_{O_2} = 0.21\ (\lambda - 1)\ A_{min}$$
$$= 0.21\ (1.1 - 1)\ 9.9 = 0.21\ m^3/m^3$$

$$V_{H_2O} = 2\ CH_4 + 6/2\ C_2H_6 + 8/2\ C_3H_8 + 1.6\ x\ A$$
$$= 20.93 + 30.02 + 4 \times 0.03 + 1.6 \times 0.009 \times 10.89 = 2.20\ m^3/m^3$$

4. حجم غازات الاحتراق الرطبة هي مجموع الغازات السابقة

$$V_G = V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{H_2O}$$
$$= 1.07 + 8.61 + 0.21 + 2.20 = 12.09\ m^3/m^3$$

الحجم الجزئي والضغط الجزئي لمركبات غازات الاحتراق

تحسب نسبة الحجم الجزئي لمركبات غازات الاحتراق (CO_2، H_2O، N_2، O_2، SO_2 وأحياناً CO) من حجم كلٍ منها والحجم الإجمالي V_G للغازات الرطبة (بالـ m^3 لكل m^3 من الوقود الغازي عند الشروط النظامية أي 0 °C و1.013 bar)

$$r = V / V_G \qquad (40.2)$$

إن مجموع نسب الحجوم الجزئية للمركبات الداخلة في تركيب غازات الاحتراق يساوي الواحد.

وينتج الضغط الجزئي p_i لأحد مركبات غازات الاحتراق من نسبة الحجم الجزئي r والضغط الكلي للغازات.

$$p_i = r_i \; p \quad [\mathrm{Pa}] \qquad (41.2)$$

وبحسب قانون دالتون فإن مجموع الضغوط الجزئية للمركبات الداخلة في تركيب غازات الاحتراق يساوي الضغط الكلي:

$$\Sigma \, p_i = p \qquad (42.2)$$

تستخدم الضغوط الجزئية لثاني أوكسيد الكربون وبخار الماء في حساب انتقال الحرارة بالإشعاع في حجرة الاحتراق وسطوح التبادل الحراري لمولد البخار.

مثال 5.2

للغاز الطبيعي الوارد في المثال 4.2 يطلب حساب الحجوم الجزئية والضغوط الجزئية لمركبات غازات الاحتراق. الضغط الكلي في حجرة الاحتراق: $p = 1$ bar.

الحل

1. من المثال 4.2 نجد حجم غازات الاحتراق المختلفة وحجم الغازات الرطبة الإجمالية:

$$V_{CO_2} = 1.07\ \mathrm{m^3/m^3}\ ،\ V_{N_2} = 8.61\ \mathrm{m^3/m^3}$$

$$V_{O_2} = 0.21\ \mathrm{m^3/m^3}\ ،\ V_{H_2O} = 2.20\ \mathrm{m^3/m^3}،\ V_G = 12.09\ \mathrm{m^3/m^3}$$

2. الحجم الجزئي لـ CO_2 في الغازات الرطبة (على سبيل المثال):

$$r_{CO_2} = V_{CO_2} / V_G$$

$$= 1.07 / 12.09 = 0.111\ \mathrm{m^3/m^3}$$

والضغط الجزئي لـ CO_2

$$p_{CO_2} = p\, r_{CO_2} = 1 \times 0.111 = 0.111 \text{ bar}$$

3.تحسب بطريقة مشابهة المركبات الأخرى لغازات الاحتراق، والجدول 8.2 يعطي المعطيات والنتائج.

الجدول 8.2: المعطيات والنتائج للمثال 5.2

مركبات الغاز الطبيعي	الحجم بالـ m^3/m^3	نسبة الحجم الجزئي r_i بالـ m^3/m^3	الضغط الجزئي p_i بالـ bar
CO_2	1.07	0.111	0.111
N_2	8.61	0.690	0.690
O_2	0.21	0.017	1.017
H_2O	2.20	0.182	0.182
المجموع	**12.09**	**1.000**	**1.000**

القيم المميزة والانتالبـــي لغازات الاحتراق

تُحسب الكتلة النوعية لغازات الاحتراق (بالـ kg/m^3 عند الشروط النظامية) كما يلي:

$$\rho_G = \sum r_i\, \rho_i$$

$$= 1.977\, r_{CO_2} + 0.804\, r_{H_2O} + 2.931\, r_{SO_2} + 1.257\, r_{N_2} + 1.429 r_{O_2}\ 1.25\, r_{CO} \qquad (43.2)$$

حيث: r_i الحجم الجزئي للمركب i من غازات الاحتراق $[m^3/m^3]$

ρ_i الكتلة النوعية للمركب i من غازات الاحتراق $[kg/m^3]$.

تزداد قيمة الكتل النوعية ρ_G كلما ازداد محتوى الغازات من CO_2 و SO_2 وتقل قيمة ρ_G بازدياد محتوى الغازات من H_2O.

تُحسب السعة الحرارية النوعية الوسطية لغازات الاحتراق بثبوت الضغط من العلاقة:

$$c_{PG} = \sum g_i\, c_{pi} \quad [kJ/kg] \qquad (44.2)$$

حيث: g_i النسبة الكتلية للمركب i في غازات الاحتراق $[kJ/kg]$

c_{pi} السعة الحرارية النوعية الوسطية للمركب i من الغازات عند ثبوت الضغط $[kJ/kg]$ (الجدول 9.2).

يحسب الانتالبـــي لغازات الاحتراق h_G عند درجة حرارة معينة t كما يلي:

$$h_G = V_G \, c_{pG} \, t \quad [\text{kJ لكل kg1 أو } m^3 \text{ وقود}] \qquad (45.2)$$

الجدول 9.2: السعة الحرارية الوسطية النوعية c_p للغازات [kJ/kgK] في مجال درجات الحرارة بين 0 و t^oC

درجة الحرارة بالـ °C	الهواء	N_2	O_2	CO_2	H_2O	SO_2
0	1.0037	1.0394	0.9148	0.8165	1.8591	0.6083
100	1.0065	1.0404	0.9230	0.8677	1.8724	0.6365
200	1.0117	1.0434	0.9355	0.9122	1.8931	0.6634
300	1.0192	1.0490	0.9500	0.9509	1.9185	0.6877
400	1.0286	1.0568	0.9649	0.9850	1.9467	0.7090
500	1.0389	1.0661	0.9792	1.0152	1.9767	0.7274
600	1.0498	1.0764	0.9925	1.0422	2.0082	0.7433
800	1.0712	1.0976	1.0158	1.0881	2.0741	0.7692
1000	1.0910	1.1179	1.0350	1.1253	2.1414	0.7891
1200	1.1087	1.1363	1.0512	1.1560	2.2078	0.8049
1400	1.1243	1.1528	1.0651	1.1816	2.2714	0.8178
1600	1.1382	1.1673	1.0775	1.2032	2.3311	0.8286
1800	1.1505	1.1801	1.0888	1.2217	2.3866	0.8377
2000	1.1615	1.1914	1.0993	1.2377	2.4379	0.8457
2200	1.1714	1.2015	1.1092	1.2517	2.4851	0.8527

أما عامل التوصيل الحراري λ_G لغازات الاحتراق فيحسب من المعادلة التقريبية التالية:

$$\lambda_G = \sum g_i \, \lambda_i \quad [W/mK] \qquad (46.2)$$

حيث: g_i الكتلة الجزئية للمركب i من غازات الاحتراق [kg/kg]

λ_i عامل التوصيل الحراري للمركب i من غازات الاحتراق [W/mK].

يمكن أخذ قيم λ من الجدول 10.2.

الجدول 10.2: عامل التوصيل الحراري λ [W/mK] للغازات عند bar 1.

درجة الحرارة بالـ °C	الهواء	N_2	O_2	CO_2	H_2O	SO_2
0	0.0243	0.0243	0.0246	0.0143	0.0182	0.0084
100	0.0314	0.0304	0.0317	0.0213	0.0248	–
200	0.0386	0.0383	0.0407	0.0286	0.0431	–
300	0.0454	0.0442	0.0476	0.0352	–	–

هناك علاقة بين الكتل الجزئية g_i [kg/kg] والضغوط الجزئية r_i [m^3/m^3] لمركبات غازات الاحتراق وهي:

$$g_i = m_i / m = V_i \rho_i / V \rho = r_i \rho_i / \rho = r_i M_i / M \quad (47.2)$$

حيث: m_i أو m كتلة المركب i من غازات الاحتراق أو كتلة غاز الاحتراق [kg]

V_i أو V حجم المركب i من غازات الاحتراق أو حجم غاز الاحتراق [m^3]

ρ_i أو ρ الكتلة النوعية للمركب i من غازات الاحتراق أو الكتلة النوعية لغازات الاحتراق[kg/m^3]

M_i أو M الكتلة المولية i من غازات الاحتراق أو الكتلة المولية لغازات الاحتراق بمحملها .[kg/kmol]

تحسب قيمة الانتالبي لغازات الاحتراق في مجال درجات الحرارة بين 0 °C والدرجة t كما يلي:

من أجل 1 kg وقود صلب أو سائل أو 1 m^3 وقود غازي تُطبّق العلاقة التالية:

$$H_G = V_G \, c_{pG} \, t \quad [m^3 \text{ أو } kg/kJ] \quad (48.2)$$

حيث: V_G حجم غازات الاحتراق [m^3 لكل 1 kg أو 1 m^3 وقود]

c_{PG} السعة الحرارية الوسطية النوعية لغازات الاحتراق [kJ/m^3K].

3.2 درجة حرارة الاحتراق

تحدد درجة حرارة الاحتراق ودرجة حرارة غازات الاحتراق عند مخرج حجرة الاحتراق عن طريق الانتالبـــي بناءً على الموازنة الحرارية لحجرة الاحتراق:

$$m_F = (L_{CV} + c_F \; t_F + A \; \rho_A \; c_{PA} \; t_A) = m_F \; h_G \quad [kJ/S] \quad (49.2)$$

$$m_F \; h_G = Q_{FR} + Q_L \quad [kJ/s] \quad (50.2)$$

حيث: m_F تدفق الوقود الصلب والسائل [kg/s] أو الوقود الغازي [m^3/s]

LCV القيمة الحرارية الدنيا للوقود [kJ/kg] أو [kJ/m^3]

A استهلاك الهواء [m^3/kg أو m^3/m^3 للوقود الغازي]

ρ_A الكتلة النوعية للهواء [kg/m^3]

C_F أو C_{PA} السعة الحرارية النوعية للوقود أو الهواء [kJ/kgK]

t_F أو t_A درجة حرارة الوقود أو الهواء [°C]

h_G الانتالبـــي النوعي لغازات الاحتراق [kJ/s]

Q_{FR} التيار الحراري المفيد في حجرة الاحتراق [kJ/s]

عندمـــا يكون الاحتـــراق كاملاً وبدون ضياعات للطاقة ($Q_L = 0$) وبدون تبادل حراري ($Q_{FR} = 0$) تنتج درجة حرارة الاحتراق النظرية (الأدياباتية أو الكظيمة) t_{th}. إذا أهملت الحرارة المحسوسة للوقود والهواء يصبح:

$$t_{th} = LCV/\ V_G\ r_G\ C_{PG} = h_G/C_{PG} \qquad (51.2)$$

يمكن تحديد حرارة حجرة الاحتراق الفعلية t_{FR} بشكل تقريبي كما يلي:

$$t_{FR} = \varphi\ \ t_{th} \qquad (52.2)$$

حيث: φ عامل تخفيض يراعي التبادل الحراري من حجرة الاحتراق، وهو يتعلق بطريقة احتراق الوقود (نوع الحرّاق).

عند درجات حرارة تفوق الـــ 1500 °C يحدث تفكك لـــ CO_2 وH_2O وتستهلك لهذا حرارة بحيث تصبح درجة الحرارة في حجرة الاحتراق أقل، وهذا الأمر يعقّد حساب درجة حرارة الاحتراق.

في الجدول (11.2) توجد قيم استرشادية لدرجة حرارة الاحتراق النظرية t_{th} ولدرجة حرارة حجرة الاحتراق t_{FR}.

الجدول 11.2: درجة الحرارة النظرية t_{th} لمختلف أنواع الوقود، ودرجة حرارة حجرة الاحتراق t_{FR} لمختلف أنواع الوقود.

t_{th} بالـــ °C	t_{FR} بالـــ °C
الفحم الحجري 2200 – 2300	لحراقات مسحوق الفحم الحجري 1200 – 1500 لحراقات الفحم الحجري مع تصريف الخبث بالحالة المصهورة 1400 – 1800
الفحم البني 1400 – 1500	لحراقات مسحوق الفحم البني 1000 – 1150 لحراقات مسحوق الفحم البني في فرشة الوقود السائل – 900 800
الوقود السائل الثقيل والخفيف 2000 – 2100	لحراقات الوقود السائل 1200 – 1600
الغاز الطبيعي حوالي 2000	لحراقات الوقود الغازي 1200 – 1600

4.2 اختبار جودة الاحتراق

لاختبار جودة الاحتراق تجرى عملية تحليل لغازات الاحتراق ويُحدَّد المحتوى من الأكسجين (O_2) وثاني أكسيد الكربون (CO_2) في غازات الاحتراق الجافة. إن تحديد نسبة CO_2 في غازات الاحتراق معيار هام في تحديد جودة الاحتراق.

عند احتراق كامل للوقود بدون عامل زيادة هواء $\lambda = 1$ تصل قيمة محتوى CO_2 في الغازات إلى حدها الأعظمي CO_{2max}.

من أجل الوقود الصلب والسائل [كنسب حجمية]:

$$CO_{2max} = 1.867\, C / V_G \tag{53.2}$$

حيث: C محتوى الوقود من الكربون [kJ/kg]

V_G حجم غازات الاحتراق [m^3/kg].

عندما تكون قيمة C = 1، أي من أجل الفحم الصافي تصبح قيمة CO_{2max} = 21 % [حجماً].

يعطي الجدول (12.2) قيم CO_{2max} لأنواع مختلفة من الوقود على سبيل المثال.

الجدول 12.2: قيم CO_{2max} لأنواع مختلفة من الوقود

نوع الوقود	CO_{2max} كنسبة حجمية مئوية
فحم حجري وبني	18.6 – 19.8
– غني بالكربون	18 – 7
– فقير بالكربون	19.1
– انتراسيت	19.2
فحم الكوك	20.6
وقود سائل (فيول أويل)	15.5 – 16.0
غاز طبيعي	12.5

من قيمة CO_2 المقاسة وCO_{2max} تنتج قيمة محتوى غازات الاحتراق من الأكسجين (O_2):

$$O_2 = 21\,(1 - CO_2 / CO_{2max}) \quad \text{[كنسبة حجمية]} \tag{54.2}$$

ويحسب عامل زيادة الهواء λ بشكل تقريبي كما يلي:

$$\lambda = CO_{2max} / CO_2 \tag{55.2}$$

إذا أجري تحليل لغازات الاحتراق وتمّ قياس محتوى الغازات من O_2 فإن عامل زيادة الهواء يكون:

$$\lambda = 21 / (21 - O_2) \qquad (56.2)$$

درجة حرارة تكاثف غازات الاحتراق

درجة حرارة التكاثف هي حرارة الإشباع لبخار الماء عند ضغطه الجزئي، ويمكن قراءتها مباشرة من جدول البخار. إذا انخفضت درجة حرارة غازات الاحتراق إلى ما دون درجة حرارة التكاثف، عندها يحدث تكاثف لبخار الماء الموجود في غازات الاحتراق، ومع SO_2 و SO_3 تنشأ الحموض H_2SO_3 وH_2SO_4 التي تؤدي إلى تآكل (صدأ) سطوح التسخين كالموفر، ومسخن الهواء الأولي. تحاشياً لهذا الصدأ يجب أن تبقى درجة حرارة غازات الاحتراق أعلى من درجة حرارة التكاثف.

مثال 6.2

من اجل فحم بني له $CO_{2max} = 19.8$ % تبين أن محتوى CO_2 في غازات الاحتراق 15.2 %. ما هو محتوى غازات الاحتراق من الـــ O_2؟ وما هي قيمة عامل زيادة الهواء؟

الحل

1. محتوى غازات الاحتراق من الأكسجين O_2

$$O_2 = 21\ (1 - 15.2 / 19.8) = 4.6\ \%$$

2. عامل زيادة الهواء

$$\lambda = 19.8 / 15.2 = 1.3$$

مثال 7.2

من أجل غازات الاحتراق التي تركيبها كما ورد في المثال 5.2 يُطلب تحديد درجة حرارة تكاثف هذه الغازات. الضغط الجزئي لبخار الماء فيها 0.182 bar.

الحل

من جدول بخار الماء وعند الضغط الجزئي 0.182 bar نجد أن درجة حرارة إشباع البخار هي 57.9 °C، وبالتالي فإن درجة حرارة تكاثف غازات الاحتراق هي $t = 57.9$ °C.

5.2 الاحتراق ذو الإصدار القليل للغازات الضارة

لتقليل إصدار غازات NO_2 تُراعى إجراءات الاحتراق التالية:

□ تخفيض درجة حرارة الاحتراق.

□ تخفيض تركيز الأوكسجين في منطقة درجة الحرارة المرتفعة من حجرة الاحتراق.

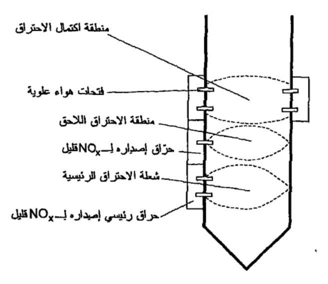
□ الإحراق على مراحل عن طريق:

ـــ إضافة الهواء على مراحل (هواء أولي – ثانوي – مرحلة ثالثة) في الحراق وفي حجرة الاحتراق

ـــ إضافة الوقود على مراحل

□ إنقاص عامل زيادة الهواء.

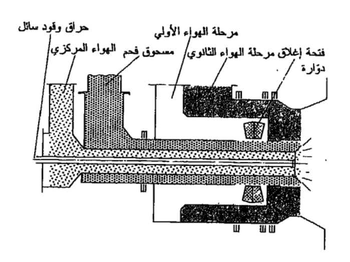
□ إعادة تمرير غازات الاحتراق على حجرة الاحتراق لتخفيض درجة حرارتها (الحجرة) ولتخفيض تركيز الأوكسجين فيها.



الشكل 2.2 : الاحتراق على مراحل في حجرة احتراق مولد البخار.

يبين الشكل (2.2) بشكل تخطيطي الاحتراق على مراحل، وفي الشكل (3.2) هناك حراق لمسحوق الفحم ذو إضافة للهواء على مراحل يحقق احتراقاً تكون الغازات الضارة الناتجة عنه قليلة.

عند استخدام حراقات فحم مسحوق تطلق قدراً صغيراً من NO_x ينخفض إصدار NO_x ليصبح 400 حتى 800 mg NO_2 لكل 1 m^3 من غازات الاحتراق، ويمكن تخفيض الإصدار حتى يصبح بين 200 و 400 mg لكل 1 m^3 من غازات الاحتراق.



الشكل 3.2 : حراق مسحوق فحم ذو إضافة للهواء على مراحل.

إذا استخدم أسلوب الاحتراق على مراحل وتم تمرير غازات الاحتراق ثانية (إعادة تدويرها) إلى حجرة الاحتراق يحدث الاحتراق في فرشة الوقود السائلة عند درجات حرارة منخفضة تصل إلى 850 °C، وهذا مناسب لتقليل إصدار كلٍّ من أكاسيد الآزوت والكبريت.

في حراقات فرشة الوقود السائلة ينخفض إصدار NO_2 ليتراوح بين 100 و300 mg NO_2 لكل 1 m^3 من غازات الاحتراق، وسيعالج في الفصل الرابع بشكل مفصل الاحتراق في فرشة الوقود السائلة الرفيق بالبيئة. أما تقليل إصدار الغازات الضارة في محطات الطاقة البخارية والغازية والمشتركة فسيجري عرضه في الفصول الرابع والسادس والسابع والثامن.

3 المحطات البخارية

1.3 أنواع محطات الطاقة

تقسم محطات الطاقة وفقاً لنوع الطاقة الأولية المستخدمة إلى:

ـــ المحطات الحرارية (العنفات البخارية والغازية)

ـــ المحطات المائية (الماء الجاري، ماء الخزانات أو السدود ومحطات تخزين الماء بالضخ)

ـــ المحطات النووية

ـــ المحطات الشمسية (المزارع الشمسية، الأبراج الشمسية، المعدات الكهرضوئية – الفوتوثولطية – أي ذات الخلايا الشمسية)

ـــ محطات الرياح

ـــ المحطات الجيوحرارية (الطاقة الحرارية لباطن الأرض)

ـــ محطات قوة المدّ والجزر

تبلغ الاستطاعة التي تقدمها محطات الطاقة في العالم حالياً ما يزيد على GW 2000* حوالي 70% منها يُولّد بالوقود المستحاثي: أكبر استطاعة تقدمها محطة منفردةً (وحدة توليد واحدة) تتراوح بين 700 و1000 MW عند استخدام الوقود المستحاثي و1300 MW في المحطات النووية و280 MW للمحطات التي تعمل بالعنفات الغازية و80 MW للمحطات الشمسية و2 إلى 3 MW في محطات الرياح و500 MW في المحطات المائية.

أما أكبر محطة طاقة تستخدم الفحم فهي في جنوب أفريقيا (محطة Kendal) واستطاعتها الكهربائية تبلغ 4116 MW وفيها 6 عنفات بخارية استطاعة كل منها 686 MW.

* في عام 1997 – المترجم.

إن مقياس جودة محطة طاقة ما هو مردودها الكهربائي الذي هو نسبة استطاعتها الكهربائية إلى الطاقة الأولية المستخدمة في واحدة الزمن، والقيم السائدة للاستطاعات والمردود في مختلف أنواع محطات الطاقة معطاة في الجدول 1.3.

الجدول 1.3: المردود النمطية لمحطات الطاقة

نوع محطة الطاقة	الاستطاعة الكهربائية MW	المردود الكهربائي %
المحطات المائية	500-10	90-85
محطات الدارة المركبة (غازي+بخاري)	300-100	58-51
المحطات البخارية	700-100	42-35
محطات التدفئة التي تستخدم محركات الاحتراق الداخلي أو العنفات الغازية	20-0.05	40-32
المحطات ذات العنفات الغازية	250-10	39.5-34
المحطات النووية	1300-500	37-33
محطات الرياح	3-0.01	30-20
المحطات الشمسية	القيمة الأعظمية 80	14-10
المحطات الفوتوفولطية ذات الخلايا الشمسية باستخدام خلايا السيليسيوم	القيمة الأعظمية 6.5	حوالي 10

أما مجموع الاستطاعات التي تقدمها محطات ألمانيا فقد بلغ عام 1990 القيمة 125.4 GW، ومن الطاقة الكهربائية المنتجة التي بلغت 380 TWh/a (في نفس العام) فإن 73 % أنتج باستخدام الوقود المستحاثي و19 % بالطاقة النووية و8 % عن طريق المحطات المائية.

تقسم محطات الطاقة الحرارية (التـــي تستخدم وقوداً مستحاثياً) إلى:

ــ محطات بخارية ذات عنفات تكثيف (فقط لتوليد الكهرباء).

ــ محطات طاقة كهربائية وحرارية ذات عنفات لتمدد البخار المتكاثف أو عنفات ذات ضغط معاكس.

ــ محطات طاقة كهربائية وحرارية تستخدم محركات الاحتراق أو العنفات الغازية.

ــ محطات ذات عنفات غازية.

ــ محطات دارة مركبة (تحوي عنفات غازية وبخارية).

ــ محطات تستخدم محركات الديزل.

تنسب التكاليف الاستثمارية إلى واحدة الاستطاعة 1 kW كاستطاعة وإلى 1 kWh كعمل. وفي الجدولين (2.3) و(3.3) نجد الكلفة النسبية للاستثمار وللوقود وكذلك السطح والحجم اللازمين لمختلف أنواع محطات الطاقة، وقد أخذت القيمتان 2500 DM/kW* و0.03 DM/kWh وأسعار عام 1985 من أجل محطات إحراق الفحم الحجري كقيم مرجعية.

الجدول 2.3: التكاليف الاستثمارية وتكاليف الوقود النسبية لأنواع مختلفة من محطات التوليد

نوع المحطة	الكلفة النسبية للاستثمار [%]	الكلفة النسبية للوقود [%]
محطة تحرق الفحم الحجري	100	100
محطة تحرق الفحم البني	120	130
محطة ذات عنفة غازية	40	300

الجدول 3.3: المساحة والحجم اللازمان (دون المنشآت المساعدة) منسوبة إلى 1 kW من استطاعة المحطة

الوقود	المساحة اللازمة [m^2/kW]	الحجم اللازم [m^3/kW]
الفحم الحجري	17.5	750
الفحم البني	19.5	1100
الوقود السائل(الفيول أويل)	7.9	4.20

أما الجدول (4.3) فيعطي الطاقة المستهلكة لبناء مختلف محطات الطاقة .

الجدول 4.3: الطاقة المستهلكة لإنشاء المحطات المختلفة [محسوبة بـــ kWh لكل 1kW من الاستطاعة الكهربائية].

نوع المحطة	[MW] P_{el}	[kWh/kW] $E_{building}$
محطات بخارية	700-10	1.1-0.5
محطات العنفات الغازية	240-1	0.5-0.2
محطات الدارة المركبة (بخارية+غازية)	1000-70	1.1-0.8
محطات التدفئة	20-0.05	1.3-0.8
المحطات المائية	100-5	0.4-0.2
المحطات الشمسية	80-1	10-5
المحطات النووية	1300-700	4-1.3

* DM تعنـــي المارك الألمانـــي ـــ المترجم.

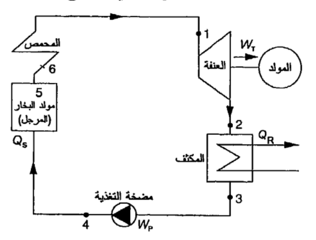
وبحسب نوع الاستعمال نميز بين الحمولة الأساسية (base load) والحمولة المتوسطة وحمولة الذروة للمحطة (Peak load).

تعمل محطات الحمولة الأساسية ما يعادل أكثر من 5000 ساعة في العام من الحمولة الاسمية، وهذا يعني حوالي 50 % من حمولتها الإجمالية. وهي تعمل في ألمانيا على الفحم البنـــي والطاقة النووية وعلى المياه الجارية. أما محطات الحمولة المتوسطة فيكون استخدامها 2000 إلى 5000 ساعة في العام، وهو ما يعادل حوالي 30 % من حمولتها الإجمالية وتعمل على الفحم الحجري. وفي محطات الذروة يستخدم الوقود السائل (الفيول أويل) والغاز الطبيعي، ويعتمد على العنفات الغازية وعلى المحطات ذات مضخات التخزين لتغطية حمولة الذروة. توجد في الوقت الحاضر منشآت دارة مركبة تستخدم فيها العنفات الغازية من أجل الحمولة الأساسية

2.3 التصميم الأساسي للمحطات البخارية (تركيبها وأجزاؤها)

التصميم الأساسي للمحطة البخارية

الأجزاء الأساسية للمحطة البخارية هي: مولد البخار، المحمّص، العنفة البخارية والمولد الكهربائي، المكثف ومضخة مياه التغذية كما هو مبين في الشكل (1.3).



الشكل 1.3 : مخطط أجزاء المحطة البخارية.

يتم في مولد البخار تسخين وسيط العمل الذي هو الماء من درجة الحرارة الابتدائية (النقطة 4) إلى درجة حرارة الإشباع ثم تبخره، ويحدث هذا عند ضغط ثابت p_1 . يجري في المحمّص تسخين إضافي للبخار المشبع من درجة حرارة الإشباع إلى درجة حرارة البخار الطازج. في العنفة البخارية

يتمدد البخار الطازج (من النقطة 1) بدون تبادل حراري مع الوسط الخارجي وبهذا ينخفض الضغط من p_1 إلى p_2 وينتقل البخار من العنفة إلى المكثف حيث يتم فيه تكاثف البخار عند ضغط ثابت وذلك بإعطاء الحرارة إلى ماء التبريد. ينتقل الماء المتكاثف (ماء يغلي ضغطه p_2) بواسطة مضخة التغذية إلى مولد البخار فيرتفع الضغط من p_2 إلى p_1.

تحليل عملية البخار البسيطة

تعمل المحطة البخارية وفقاً لدورة كلاوزيوس ــ رانكين المبينة في الشكل (2.3) على المحاور T,s و p,v و h,s.

سنعرض لاحقاً التحليل الترموديناميكي لهذه الدورة، حيث تجري في دورة كلاوزيوس ــ رانكين العمليات التالية:

- □ تمدد ايزونتروبـــي (بثبوت s) للبخار في العنفة (1 – 2)،
- □ تكاثف البخار في المكثف (2 – 3) عند ضغط ثابت p_2 ودرجة حرارة ثابتة t_2،
- □ انضغاط ايزونتروبـــي للماء في مضخة مياه التغذية (3 – 4)،
- □ إضافة للحرارة بثبوت الضغط إلى وسيط العمل (4 – 1) ويتم هذا في مولد البخار [(4 – 5) تسخين أولي للماء في الموفر، ثم تبخر (4 – 5) في المبخر وبعدها تحميص (1 – 6) في المحمص)].

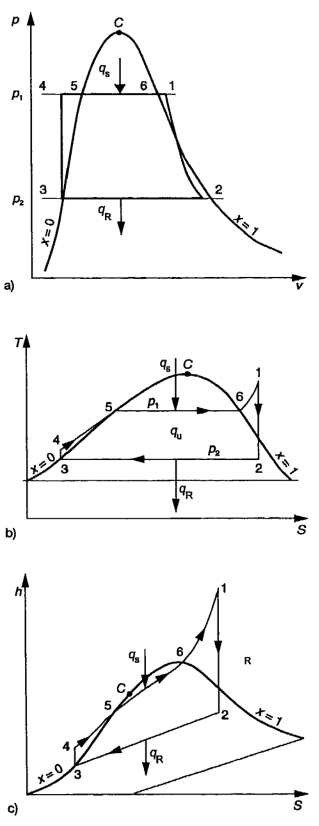
يحدث في العنفة تمدد أدياباتـــي (نظرياً هو ايزونتروبي) للبخار من الحالة الابتدائية (بخار محمص ضغطه p_1 ودرجة حرارته t_1 والانتالبـــي النوعي له h_1) إلى الحالة 2 (بخار رطب ضغطه p_2 ودرجة حرارته t_2 والانتالبـــي النوعي له h_2) ويتم ذلك عند انتروبـــي نوعي ثابت ($s_1 = s_2$).

العمل المحرك النوعي: هو العمل الناتج عن 1 kg بخار عند تمدده بشكل عكوس في العنفة وهو يساوي هبوط الانتالبـــي لهذا البخار Δh_T:

$$w_T = \Delta h_T = h_1 - h_2 \quad [kJ/kg] \tag{1.3}$$

في المكثف تُطرح الحرارة عند ضغط ثابت $p_2 = const$ وأثناء ذلك تبقى درجة الحرارة مساويةً لدرجة حرارة الإشباع t_s المقابلة لذلك الضغط. في مدخل المكثف يقع الوسيط العامل الذي هو البخار (عند النقطة 2) في مجال البخار الرطب وتكون نسبة جفافه أصغر من الواحد ($x_2 < 1$) وبالتالي فنسبة رطوبته ($x_2 - 1$) أما الماء المتكاثف عند مخرج المكثف فهو سائل مشبع عند الضغط p_2 ولذلك تقع النقطة 3 على منحني الإشباع ($x = 0$). تنتج الحرارة المطروحة من كل 1 kg بخار من فرق الانتالبي كما يلي:

$$q_R = h_2 - h_3 \quad [kJ/kg] \tag{2.3}$$



الشكل 2.3: دورة عمل كلاوزيوس رانكين *(a)* على المخطط *p,v*؛ *(b)* على المخطط *T,s*؛ *(c)* على المخطط *h,s*.

يحدث في مضخة مياه التغذية انضغاط ايزونتروبـــي للماء ويرافق ذلك ارتفاع للضغط من p_2 إلى p_1 وللانتالبـــي من h_3 إلى h_4. يبلغ الاستهلاك النوعي للعمل المبذول لدورة العمل بالنسبة إلى 1 kg ماء:

$$w_p = v_3 (p_1 - p_2) = h_4 - h_3 \quad [kJ/kg] \qquad (3.3)$$

أما العمل النوعي المفيد لدورة العمل بالنسبة إلى 1 kg بخار فيحسب كما يلي:

$$w_u = w_T - w_p \quad [kJ/kg] \qquad (4.3)$$

من المعادلة (3.3) يمكن حساب الانتالبـــي النوعي للماء h_4:

$$h_4 = h_3 + w_p \quad [kJ/kg] \qquad (5.3)$$

تتم إضافة الحرارة في مولد البخار والمحمص عند ضغط ثابت $p_1 = const$. في البداية يُسخَّن الماء حتى يصل إلى درجة حرارة الإشباع t_{s1} (4 – 5)، بعد ذلك يتبخر الماء عند درجة حرارة ثابتة t_{s1} (5 – 6)، وأخيراً يجري التحميص حيث ترتفع درجة الحرارة للبخار من t_{s1} إلى t_1.

تحسب الحرارة النوعية المضافة لكل 1 kg من البخار كما يلي:

$$q_s = c_{PW} (t_{s1} - t_4) + h_{eva} + c_{p,v} (t_1 - t_{s1}) \quad [kJ/kg] \qquad (6.3)$$

حيث: c_{pv} و c_{pw} الحرارة للبخار وللماء على التوالي [kJ/kg]

t_{s1} درجة حرارة الإشباع عند الضغط p_1 بالـــ [°C]

t_4 درجة حرارة ماء التغذية [°C]

h_{eva} الإنتالبـــي النوعي للتبخير [kJ/kg]

t_1 درجة حرارة البخار المحمص (البخار الطازج) [°C]

تحسب q_s عادة عن طريق الانتالبـــي النوعي للبخار الطازج h_1 وانتالبـــي الماء h_4:

$$q_s = h_1 - h_4 \quad [kJ/kg] \qquad (7.3)$$

تحسب معادلة موازنة الإكسرجي للمنشأة البخارية من أجل 1 kg بخار كما يلي:

$$q_s + w_p = w_T + q_R \quad [kJ/kg] \qquad (8.3)$$

إن الماء وسيط غير قابل للانضغاط ولذلك فإن العمل اللازم للمضخة w_p صغير عند مقارنته بالحدود الأخرى للمعادلة 7.3، وبالتالي فالحد w_p لا يؤخذ بعين الاعتبار ويعتبر العمل النوعي المفيد w_u للدورة مساوياً لـ w_T.

من المعادلة 3.3 ينتج:

$$h_4 = h_3 + w_p \approx h_3 \qquad (9.3)$$

إضافة إلى ذلك يكتب انتالبـــي الماء المتكاثف h_3 بالشكل h_2' وهذا يوافق انتالبـــي السائل المشبع (الماء الذي يغلي) عند الضغط p_2.

النقطة الحدية لبخار الماء هي:

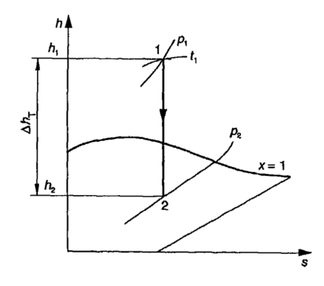
$$p_{cr} = 221.2 \text{ bar} \text{ ، } t_{cr} = 374.15 \text{ °C}$$

وبالتالي ينتج:

$$q_s \approx h_1 - h_2' \quad [\text{kJ/kg}] \qquad (10.3)$$

وكذلك:

$$q_R \approx h_2 - h_2' \quad [\text{kJ/kg}] \qquad (11.3)$$



الشكل 3.3 : التمدد الايزونتروبـــي لبخار الماء في المخطط h-s.

مردود دورة *عمل البخار*، والتي يعبر عنها بالمردود الحراري:

$$\eta_{th} = \frac{w_T}{q_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_2 - h_2'} \qquad (12.3)$$

لتحديد الانتالبـــي h_1 وh_2 يستخدم المخطط h-s لبخار الماء، والشكل (3.3) يبين تمدداً ايزونتروبياً لبخار الماء في المخطط h-s، وقد أشير إلى هبوط الانتالبـــي بـــ Δh_1. الأمثلة التالية توضح الاستخدام العملي للتحليل الترموديناميكي لدورة البخار البسيطة.

مثال 1.3

محطة بخارية تعمل وفق دورة رانكين ـــ كلاوزيوس حيث شروط الدخول إلى العنفة هي: $p_1 =$ 13.5 MPa، $t_1 = 535$ °C، وضغط المكثف $p_2 = 0.006$ Mpa.

بالاستعانة بكلٍّ من المخطط h-s وجداول الماء والبخار عند الإشباع (انظر الجدول A.5 حتى A.9 في الملحق)، يُطلب تحديد ما يلي:

1. مواصفات الحالة لوسيط العمل (الضغط p، درجة الحرارة t، الحجم النوعي v، الطاقة الداخلية النوعية u، الانتروبـــي النوعي s) عند النقاط المميزة لدورة العمل.
2. العمل المبذول لتشغيل العنفة.
3. نسبة الجفاف والرطوبة بعد التمدد في العنفة.

الحل

1. يمكن قراءة الانتالبـــي النوعي h_1 والانتروبـــي النوعي s_1 للبخار المحمص (النقطة 1) عند ضغط معطىً p_1 ودرجة حرارة معطاة t_1. كذلك يمكن تحديد الانتالبي النوعي h_2 للبخار الرطب عند p_2 (النقطة 2) بنفس الطريقة من المخطط h-s (انظر الشكل A.1 في الملحق) خلال ذلك يكون $s_1 = s_2$. الحجم النوعي v يمكن إيجـــاده مـــن الجدول A.9 (انظر الملحق). القيم المميزة للمـــاء (s، h، v، t) عند حالة الإشباع 3 تؤخذ من الجدول A.5 أو A.6 (الملحق) عند الضغط p_2. الطاقة الداخلية النوعية u لوسيط العمل تحسب بشكل عام كما يلي: $u = h - p\ v$.
2. نسبة الجفاف للبخار بعد تمدده في العنفة يستنتج من المخطط h-s: $x_2 = 0.77$، أما الرطوبة النهائية فهي $(1 - x_2)$ أي 0.23.
3. مواصفات البخار بعد تمدده في العنفة (النقطة 2) تُحسب من مواصفات الماء والبخار عند حالة الإشباع عند الضغط p_2 ونسبة الجفاف x_2 للبخار المغادر للعنفة. الحجم النوعي للبخار الرطب v_2 ينتج من الحجم النوعي للماء عند نقطة الإشباع ($v' = 1.0064 \times 10^{-3}$ m³/kg) والحجم النوعي للبخار المشبع ($v'' = 23.74$ m³/kg) ويصبح:

$$v_2 = (1 - x_2)\, v' + x_2\, v''$$
$$= (1 - 0.77)\, 1.0064 \times 10^{-3} + 0.77 \times 23.74$$
$$\approx 0.77 \times 23.74 = 18.28\ \text{m}^3/\text{kg}$$

4. لحساب العمل المبذول لتشغيل العنفة نكتب:

$$w_p = v_3\,(p_1 - p_2)$$
$$= 1.0064 \times 10^{-3}\ \text{m}^3/\text{kg}\ (13500 - 6)\ \text{KPa} = 13.58\ \text{kJ}/\text{kg}$$

5. الانتالبي النوعي للماء عند النقطة 4:

$$h_4 = h_3 + w_p$$
$$= 151.5\ \text{kJ}/\text{kg} + 13.58\ \text{kJ}/\text{kg} = 165.08\ \text{kJ}/\text{kg}$$

6. درجة حرارة الماء عند النقطة 4 حيث الضغط $p_1 = 13.5$ MPa و $h_4 = 165.08$ kJ / kg تؤخذ من الجدول A.3 وهي $t_4 = 36.551$°C.

كل هذه القيم رتبت في الجدول (5.3) حيث تم تمييز القيم المعطاة في المسألة بوضع خط تحتها أما القيم التي تم حسابها فكتبت بحروف غامقة.

الجدول 5.3: مواصفات الحالة للماء والبخار عند النقاط المميزة الواقعة على دورة عمل كلاوزيوس – رانكين

حالة النقطة	P[MPa]	t[°C]	v[m³/kg]	u[kJ/kg]	h[kJ/kg]	s[kJ/kgK]
1	13.5	535	0.02429	3392.21	3425	6.54
2	0.006	36.183	18.28	1905.32	2015	6.54
3	0.006	36.183	1.0064×10^{-3}	151.494	151.50	0.5209
4	13.5	36.551	1.0064×10^{-3}	151.494	165.08	0.5209

مثال 2.3

من أجل المحطة البخارية الواردة في المثال 1.3، وبإهمال العمل المبذول لتشغيل العنفة، يُطلب تحديد المقادير التالية لدورة العمل: العمل النوعي للعنفة، الحرارة النوعية المضافة والمطروحة، المردود الحراري النظري للدورة.

يمكن الاستعانة بالجدول 5.3 لتحديد مواصفات وسيط العمل (البخار/الماء).

الحل:

1. العمل النوعي للعنفة:

$$w_T = h_1 - h_2 = 3425 - 2015 = 1410 \text{ kJ/kg}$$

العمل المفيد للدورة: $w_u = w_T = 1410 \text{ kJ/kg}$

2. بما أن $w_p = 0$ فإن: $h_4 = h_3 = 151.50$

و $t_4 = t_3 = 36.183°C$

3. الحرارة النوعية المضافة:

$$q_s = h_1 - h_4 = 3425 - 165.08 = 3259.92 \text{ kJ/kg}$$

الحرارة النوعية المطروحة:

$$q_R = h_2 - h_3 = 2015 - 151.50 = 1863.5 \text{ kJ/kg}$$

4. المردود الحراري للدورة:

$$\eta_{th} = \frac{1410 \text{ kJ/kg}}{3273.5 \text{ kJ/kg}} = 0.4307$$

مثال 3.3

من أجل المثال 1.3، إذا تمت مراعاة العمل اللازم لتشغيل المضخة فإنه يطلب حساب كميات الحرارة النوعية والمردود الحراري لدورة البخار، كذلك يُطلب مقارنة المردود الحراري الناتج مع المردود الحراري في المثال 2.3.

الحل

1. من المثالين 1.3 و2.3 نجد:

- العمل النوعي المستهلك لتشغيل مضخة الماء: $w_p = 13.58 \text{ kJ/kg}$
- الانتالبي النوعي للماء عند النقطة 4: $h_4 = 165.08 \text{ kJ/kg}$
- العمل النوعي للعنفة: $w_T = 1410 \text{kJ/kg}$.

2. وبالتالي العمل المفيد: $w_u = w_T - w_p = 1410 \text{ kJ/kg} - 13.58 \text{ kJ/kg} = 1396.42 \text{ kJ/kg}$

الحرارة النوعية المضافة: $q_s = h_1 - h_4 = 3425 - 165.08 = 3529.92 \text{ kJ/kg}$

المردود الحراري: $\eta_{th} = \frac{w_u}{q_s} = \frac{1396.42}{3259.92} = 0.4284$

3. بالمقارنة بالمردود $\eta_{th} = 0.4307$ الوارد في المثال 2.3 نجد أن الفرق هو فقط 0.5 %.

مثال 4.3

من أجل دورة البخار الواردة في المثال 1.3 يُطلب حساب المردود الحراري بالاستعانة بدرجة الحرارة الوسطية T_s و T_R لإضافة الحرارة وطرحها.

الحل

1. تجري عملية إضافة الحرارة بين النقطة التي تميز ماء التغذية ونقطة البخار الطازج. مواصفات ماء التغذية $p_2 = 0.006$ MPa، $t_4 = 36.55°C$، مواصفـــات البخار الطازج هي $p_1 = 13.5$ MPa، $t_1 = 335°C$ وبالتالي فدرجة حرارة إضافة الحرارة الوسطية:

$$T_s = \frac{q_s}{\Delta s_s} = \frac{3259.92 \text{ kJ/kg}}{(6.54 - 0.5209) \text{ kJ/kg}} = 541.55 \text{ K} = 268.4°C$$

2. درجـــة طـــرح الحـــرارة الوسطيـــة T_R مساويـــة لدرجة حرارة الإشباع عند ضغط المكثف $p_2 = 0.006$ MPa: $T_R = T_2 = 36.18$ °C $= 309.33$ K.

3. المردود الحراري إذاً:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{309.33K}{541.55K} = 0.4288$$

(قارن $\eta_{th} = 0.4307$ من المثال 2.3)

3.3 استطاعة العنفة البخارية

تُحسب *استطاعة العنفة النظرية (الأعظمية)* P_T عند تمدد ايزونتروبـــي للبخار (كظيم وعكوس) كما في الشكل (4.3):

(13.3)	$P_T = m_V\, w_T = m_V\, \Delta h_i = m_V\,(h_1 - h_2)$ [kW]

حيث: m_V التدفق الكتلي للبخار [kg/s]

h_1، h_2 الإنتالبـــي النوعي للبخار قبل دخوله إلى العنفة وبعد مغادرته لها [kJ/kg]

Δh_i الهبوط النظري (الإيزنتروبـــي) للإنتالبـــي ضمن العنفة [kJ/kg]

التمدد الفعلي للبخار (1 – 2) في العنفة عكوس ويرافقه زيادة في الانتروبـــي أي أن $s_{2t} > s_1$.

يحسب *العمل النوعي الفعلي للعنفة* $w_{T,t}$ عن طريق هبوط الانتالبـــي Δh_t في عنفة فعلية (الشكل 4.3).

$$w_{T,t} = \Delta h_t = h_1 - h_{2,t} \tag{14.3}$$

حيث: $h_{2,t}$ الإنتالبـــي النوعي الفعلي للبخار بعد مغادرته للعنفة [kJ/kg].

وبالتالي فالاستطاعة الفعلية للعنفة:

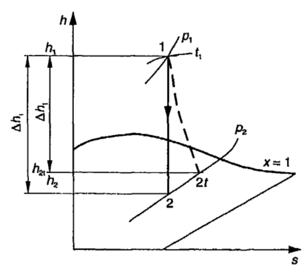
$$\begin{aligned} P_{T,t} &= P_T\ h_{iT} = m_V\ (h_1 - h_2)\ \eta_{it} \\ &= m_V\ (h_1 - h_{2,t}) \quad [kW] \end{aligned} \tag{15.3}$$

حيث: η_{iT} المردود الداخلي للعنفة.

وتتراوح قيمته للعنفات البخارية بين 0.88 و0.93.

الانتالبـــي النوعي الفعلي $h_{2,t}$ للبخار بعد العنفة:

$$h_{2,t} = h_1 - (h_1 - h_2)\ \eta_{iT} \tag{16.3}$$



الشكل 4.3: الهبوط النظري والفعلي للانتالبـــي عند تمدد البخار في العنفة بشكل عكوس أو غير عكوس.

نسبة الجفاف للبخار المغادر للعنفة قيمة هامة تؤثر على التشغيل الآمن الطويل الأمد للعنفة، وتُحسب نسبة الجفاف x_{2t} للبخار الرطب بعد مغادرته العنفة كما يلي:

$$x_{2t} = \frac{h_{2,t} - h_2'}{h_2'' - h_2'} \tag{17.3}$$

حيث: h_2' ، h_2'' الانتالبـــي النوعي لكل من الماء المشبع والبخار المشبع على التوالي عند ضغط المغادرة p_2.

أما نسبة الرطوبة النهائية للبخار بعد العنفة فهي $1 - x_{2t}$.

4.3 تحسين مردود محطات الطاقة البخارية

1.4.3 رفع مؤشرات البخار الطازج وتخفيض ضغط المكثف

طرق رفع المردود الحراري

عرض في المقطع 1.3 مبدأ رفع المردود الحراري لدورة ما تستخدم لتحويل الطاقة الحرارية إلى عمل ميكانيكي، ووفقاً لهذا المبدأ يرتفع مردود محطة الطاقة البخارية بزيادة درجة الحرارة الوسطية لإضافة الحرارة T_s وبتخفيض درجة الحرارة الوسطية الحرارة T_R. بناء على ذلك يُرفَع المردود الحراري لدورة كلاوزيوس ــ رانكين عن طريق:

- ☐ رفع الضغط p_1 ودرجة الحرارة t_1 للبخار الطازج الداخل إلى العنفة.
- ☐ تخفيض ضغط المكثف p_2.
- ☐ التحميص الوسطي للبخار.
- ☐ التسخين الأولي والمتجدد لماء التغذية.

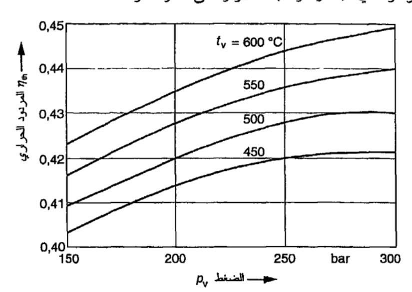
تأثير مواصفات البخار الطازج

إن رفع ضغط ودرجة حرارة البخار الطازج هو أحد الإجراءات الأساسية لتحسين المردود الحراري لمحطة الطاقة البخارية، وبهذه الطريقة ترتفع درجة الحرارة الوسطية عند الدخول T_s (الشكل 5.3) مما يؤدي إلى رفع المردود الحراري.

عند ضغط عالٍ جداً ودرجة حرارة شديدة الارتفاع للبخار الطازج تزداد الاجهادات التي تتعرض لها أجزاء المنشأة. عندما ترتفع درجة حرارة المعادن لأكثر من 550 °C فيجب استخدام أنواع عالية من الفولاذ لكل من المحمصات ولشفرات العنفة (فولاذ أوستينيتي). ولمحطات الطاقة البخارية الحديثة يصل ضغط البخار القيمة 250 إلى 300 bar ودرجة حرارته 550 إلى 600 °C.

برفع (p_1 و t_1) للبخار الطازج وبتخفيض ضغط المكثف p_2 يزداد المردود الحراري لمحطة الطاقة البخارية. والشكل (5.3) يبّين تأثير مواصفات البخار الطازج على قيمته η_{th}. تنخفض عندئذ نسبة

جفاف البخار المغادر للعنفة x_2 . وبهذا ينشأ في المرحلة الأخيرة للعنفة خطر التآكل للشفرات بفعل قطرات الماء الموجودة في البخار الرطب مما يؤثر على عمر شفرات العنفة.



الشكل 5.3 : تأثير مواصفات البخار الطازج (t_v و p_v) على المردود الحراري η_{th} لمحطة الطاقة البخارية.

مثال 5.3

إذا كانت مواصفات البخار لدى دخوله إلى العنفة من أجل المثال 1.3 كما يلي: $p_1 = 200$ bar و $t_1 = 600°C$. كيف يتغير المردود الحراري في هاتين الحالتين مقارنة بالمثال 1.3 وذلك: بإهمال العمل اللازم لتشغيل المضخة.

الحل:

1. من المثال 1.3 يمكن تحديد مواصفات النقاط المختلفة

— للبخار الطازج: $p_1 = 13.5$ MPa، $t_1 = 535°C$، $h_1 = 3425$ kJ / kg.

— البخار بعد مغادرة العنفة: $p_2 = 0.006$ MPa، $h_2 = 2015$kJ/kg.

— الماء المتكاثف (البخار بعد تمدده ومروره في المكثف) $h'_2 = 151.5$ kJ / kg .

العمل النوعي المفيد $w_u \approx w_T = 1410$ kJ / kg، الحرارة النوعية المضافة = $q_s \approx h_1 - h'_2 =$ 3273.5 kJ / kg، المردود الحراري $\eta_{th} = 0.4307$.

2. عند $p_1 = 20$ MPa و $t_1 = 600°C$ و $p_2 = 0.006$MPa نجد من المخطط s-h:

$$h_1 = 3535 \text{ kJ / kg}, s_1 = s_2 = 6.505 \text{ kJ/kg}$$

h_2 =2000 kJ /kg, $h_{\acute{2}}$ = 151.5 kJ/kg

3. لحساب العمل النوعي المفيد نكتب:

$$w_u \approx w_T = h_1 - h_2 = 3535 \text{ kJ / kg} - 2000 \text{ kJ / kg} = 1535 \text{ kJ / kg}$$

4. الحرارة النوعية الداخلة (عند الدخول):

$$q_s \approx h_1 - h_{\acute{2}} = 3535 \text{ kJ/kg} - 151.5 \text{ kJ/kg} = 3383.5 \text{ kJ/kg}$$

5. المردود الحراري للدورة المحسنة:

$$\eta_{th} = w_u / q_s = 1535 \text{ kJ/kg} / 3383.5 \text{ kJ/kg} = 0.4537$$

6. بمقارنة المردود الحراري للدورة المحسنة (0.4537) بالمردود الأصلي (0.4307) للدورة نجد أنه قد ازداد بمقدار: 5.3% = 0.4307 / (0.4307 – 0.4537).

مثال 6.3

إذا رفع ضغط المكثف في المثال 5.3 إلى p_2 = 0.1 bar فما هو المردود الحراري مقارنة بالمثال 5.3؟

الحل

1. بالاستعانة بالمخطط h-s وعند p_1 = 20 MPa، t_1 = 600°C و p_2 = 0.01 MPa نجد من أجل محطة الطاقة البخارية ما يلي:

$$h_1 = 5335 \text{ kJ/kg}, s_1 = s_2 = 6.505 \text{ kJ/kg}, h_2 = 2057 \text{ kJ/kg}, h_{\acute{2}} = 191.83 \text{ kJ/kg}$$

2. العمل النوعي المفيد: $w_u \approx w_T = h_1 - h_2 = 3535 \text{ kJ/kg} - 2057 \text{ kJ/kg} = 1478 \text{ kJ / kg}$

الحرارة النوعية عند الدخول $q_s \approx h_1 - h_{\acute{2}} = 3535 \text{ kJ/kg} - 191.83 \text{ kJ/kg} = 3343.17 \text{ kJ/kg}$

المردود الحراري $\eta_{th} = \dfrac{w_u}{q_s} = \dfrac{1478 \text{ kJ/kg}}{3443.17 \text{ kJ/kg}} = 0.4421$

3. بالمقارنة بنتائج المثال 5.3 فإن المردود الحراري ينقص بمعدل:

$$(0.4537 - 0.4421) / 0.4537 = 2.56 \%$$

2.4.3 التحميص الوسطي

الغاية الأساسية من التحميص الوسطي للبخار هي رفع نسبة جفاف البخار x بعد تمدده في العنفة لتحاشي تآكل الشفرات في المراحل الأخيرة للعنفة بفعل رطوبة البخار. وتقسم العنفة بذلك

إلى مجموعتي أجزاء: الأجزاء ذات الضغط العالي (عنفة الضغط العالي) والأجزاء ذات الضغط المنخفض (عنفة الضغط المنخفض). يتم في الجزء الوسطي تسخين البخار بعد تمدده في عنفة الضغط العالي في محمص وسطي حتى يصل إلى درجة حرارة مساوية لدرجة حرارة البخار الطازج (الذي يدخل أولاً إلى العنفة). وبهذه الطريقة يمكن رفع المردود الحراري، حيث تصبح درجة حرارة الدخول الوسطية لهذه الدورة أعلى من درجة الحرارة الوسطية بدون تحميص وسطي. الشكل (6.3) يبين أجزاء محطة الطاقة البخارية عند وجود تحميص وسطي وكذلك دورة العمل على المخطط T-s. تتألف عملية البخار بوجود تحميص وسطي من:

- تمدد في عنفة الضغط العالي (1 – 2).
- تحميص وسطي للبخار (2 – 3) في المحمص الوسطي (Reheater).
- تمدد للبخار في عنفة الضغط المنخفض (3 – 4).
- تكاثف البخار في المكثف (4 – 5).
- رفع ضغط الماء في مضخة مياه التغذية P (5 – 6).
- تسخين أولي للماء (6 – 7) ثم تبخر (7 – 8) وبعده تحميص للبخار (8 – 1) في كل من مولد البخار ثم المحمص (Superheater).

يجري التحميص الوسطي بتقديم حرارة إضافية ولذلك تحسب كمية الحرارة النوعية المضافة والعمل المفيد بإهمال العمل اللازم لتشغيل مضخة الإمداد بالماء كما يلي:

$$q_s \approx (h_1 - h'_3) + (h_3 - h_2) \quad [\text{kJ/kg}] \tag{18.3}$$

$$w_u \approx w_T = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) \quad [\text{kJ/kg}] \tag{19.3}$$

وبذلك ينتج المردود الحراري للدورة بوجود تحميص وسطي:

$$\eta_{th} = W_u / q_s = [(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)] / [(h_1 - h'_3) + (h_3 - h_2)] \tag{20.3}$$

باختيارٍ أمثل لضغط التحميص الوسطي يتحقق رفع للمردود الحراري ويمكن تحديد قيمة هذا الضغط p_{RH} بشكل متناسب مع ضغط البخار الطازج p_V وفقاً للعلاقة التقريبية التالية:

$$p_{RH} = 3\sqrt{p_V} \quad [\text{bar}] \tag{21.3}$$

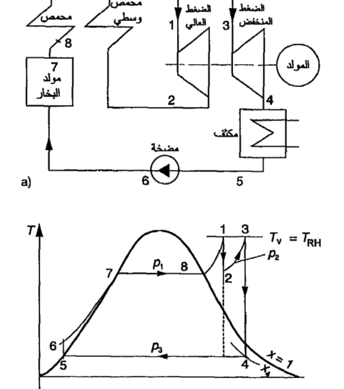
من أجل رفع إضافي لمردود عملية البخار يلجأ إلى التحميص لمرتين متتاليتين، ويمكن حساب ضغط التحميص لكل من المرحلتين بطريقة تقريبية كما يلي:

$$p_{RH,1} = 4.5\sqrt{p_V} \quad و \quad p_{RH,2} = 1.5\sqrt{p_V} \quad [bar] \tag{22.3}$$

مثال 7.3

من أجل محطة الطاقة البخارية المذكورة في المثال 1.3 تقسم العنفة إلى جزء ذي ضغط عالٍ وآخر ذي ضغط منخفض بينهما تحميص عند الضغط $p_2 = 30$ bar ليصل البخار إلى درجة الحرارة $t_3 = 535°C$ (انظر الشكلين 6.3 b,a). مواصفات بخار العنفة ذات الضغط العالي عند الدخول هي $p_1 = 13.5$ MPa و $t_1 = 535°C$ أما ضغط المكثف فهو $p_3 = 0.006$ MPa.

كيف يتغير المردود الحراري والرطوبة النهائية للبخار بعد عنفة الضغط المنخفض مقارنة بالمحطة الواردة في المثالين 1.3 و 2.3؟



الشكل 6.3 : عملية البخار مع تحميص وسطي (a) مخطط التسلسل (b) مخطط T-s.

الحل:

1. من أجل محطة الطاقة البخارية المرجعية:

للبخار الطازج $p_1 = 13.5$ MPa، $t_1 = 535°C$، $h_1 = 3425kJ/kg$، $s_1 = 6.54kJ/kg$.

البخار بعد مغادرته للعنفة: $p_2 = 0.006$ MPa، $h_2 = 2015$ kJ/kg.

وعند الضغط p_2 يكون: $h'_2 = 151.50$ kJ/kg.

العمل النوعي المفيد $w_u = 1410$ kJ/kg

الحرارة النوعية المضافة $q_s = 3273.5$ kJ/kg

المردود الحراري للمحطة البخارية المرجعية $\eta_{th} = 0.4307$. الرطوبة النهائية للبخار المغادر للعنفة $(1 - x_2 = 0.23)$

2. مواصفات البخار عند دخوله إلى عنفة الضغط العالي عند وجود تحميص وسطي هي نفس مواصفات البخار عند النقطة 1.

3. مواصفات البخار عند النقطتين 2 و3 في حالة التحميص الوسطي كالتالي: يجري التحميص إلى $p_2 = 30$ bar و$t_3 = 535°C$. من مخطط h-s نحصل على $h_3 = 3535kJ/kg$، $h_2 = 2990kJ/kg$.

4. مواصفات البخار عند النقطة 4: $p_3 = 0.006MPa$، $h_4 = 2258$ kJ/kg، $s_3 = s_4 = 7.33kJ/kg$ و $x_4 = 0.873$ (من المخطط h-s)

أما رطوبة البخار للعنفة فتبلغ $(1 - x_4 = 0.127)$ بينما تكون رطوبة البخار بدون تحميص وسطي 0.23.

5. مواصفات الماء عند النقطة 5: $h_5 = h'_3 = 151.5$ kJ/kg من الجدول (من الجدول 5.3)

6. عند إجراء التحميص الوسطي نحصل على القيم التالية:

العمل النوعي المفيد:

$$w_u \approx w_T = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)$$
$$= (3425 - 2990) + (3535 - 2258) = 435 + 1277 = 1712 \text{ kJ/kg}$$

الحرارة النوعية المضافة:

$$q_s \approx (h_1 - h'_5) = (h_3 - h_2) = (3425 - 151.5) + (3535 - 2990)$$
$$= 3273.5 + 545 = 3818.5 \text{ kJ / kg}$$

$$\eta_{th} = \frac{w_u}{q_s} = \frac{1712 kJ/kg}{3818.5 kJ/kg} = 0.4483$$

7. بالمقارنة مع المحطة المرجعية فإن المردود الحراري يتناقص بمعدل:

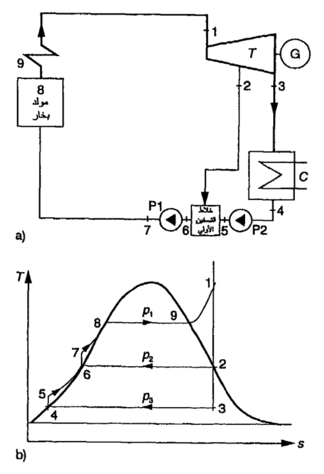
$(0.4483 - 0.4307) / 0.4307 \approx 4.1\ \%$

3.4.3 التسخين الأولي المتجدد لماء التغذية

تحليل

تعتبر عملية التسخين الأولي لماء تغذية المحطة البخارية وسيلة فعالةً في رفع المردود الحراري للمحطة.

يبين الشكل (7.3) أجزاء المحطة البخارية مع تسخين متجدد لماء التغذية بالإضافة إلى مخطط T-s للدورة.



الشكل 7.3 : محطة طاقة بخارية ذات تسخين أولي متجدد لماء التغذية (a) المخطط التسلسلي مع خلاط التسخين الأولي، (b) المخطط T-s.

تطبق العلاقات التالية:

ـــ عمل التمدد للعنفة w_T:

$$w_T = (h_1 - h_3) - a\,(h_2 - h_3) = (h_1 - h_2) + (1 - a)\,(h_2 - h_3) \quad [kJ/kg] \tag{23.3}$$

ـــ العمل اللازم لرفع ضغط وسيط العمل (المضختين)

$$\begin{aligned} w_p &= (1-a)\,v_3'\,(p_2 - p_1) + v_2'\,(p_1 - p_2) \\ &= (1-a)\,(h_5 - h_2') + (h_7 - h_3') \quad [kJ/kg] \end{aligned} \tag{24.3}$$

ـــ العمل المفيد للدورة في هذا الحالة

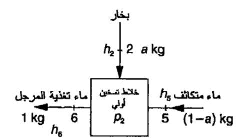
$$w_u = w_T - w_P \quad [kJ/kg] \tag{25.3}$$

المعادلات 23.3 حتى 25.3 هي قيم نوعية، أي من أجل 1 kg بخار.

إذا أهمل w_p مقارنة بـــ w_T فإن العمل النوعي المفيد:

$$w_u \approx w_T \quad [kJ/kg] \tag{26.3}$$

وبناء عليه ينتج أن العمل المفيد النوعي لدورة البخار عند التسخين المتجدد للماء أقل منه في حالة الدورة بدون تسخين أولي لمياه التغذية.



الشكل 8.3 : مخطط خلاط تسخين ماء أولي.

خلاط التسخين الأولي لماء التغذية

من أجل التسخين المتجدد لماء التغذية يمكن استخدام إما خلاط التسخين الأولي أو المسخن الأولي المقفل. وخلاطات التسخين الأولي أفضل من الناحية الترموديناميكية لأنه يمكن تسخين الماء حتى درجة حرارة إشباع البخار المستنـــزف (Bleeding Vapour)، والشكل (8.3) يبين مخطط خلاط يحدث فيه تسخين أولي للماء عن طريق الحرارة التي تنتقل من البخار المستنـــزف من العنفة بشكل مباشر إلى الماء المتكاثف. تحسب كمية البخار المستنـــزف منسوبة لـــ 1 kg بخار طازج من معادلة الموازنة الحرارية لخلاط تسخين الماء الأولي وفق العلاقة التالية:

(27.3) $$a\,h_2 + (1-a)\,h_5 = h_6$$

وباعتبار $h_6 = h'_2$ و $h_5 = h'_3$ ينتج من المعادلة السابقة:

(28.3) $$a = \frac{h'_2 - h'_3}{h_2 - h'_3}$$ [1 Kg لكل kg بخار طازج]

تتناقص الحرارة النوعية المضافة بواسطة التسخين المتجدد للماء ويصبح:

(29.3) $$q_s = h_1 - h_7 \approx h_1 - h'_2 \quad [\text{kJ/kg}]$$

ينتج المردود الحراري η_{th} لدورة عمل مسخن الماء الأولي المتجدد كما يلي:

(30.3) $$\eta_{th} = \frac{w_u}{q_s} \approx \frac{(h_1 - h_3) - a(h_2 - h_3)}{h_1 - h'_2}$$

يرتفع المردود الحراري لدورة العمل مع التسخين المتجدد لماء التغذية لأن تناقص قيمة q_s أكبر من تناقص قيمة العمل النوعي المفيد w_u.

مثال 8.3

من أجل محطة الطاقة البخارية التي ورد ذكرها في المثال 1.3، تؤخذ كمية من البخار من عنفة التكاثف وعند الضغط $p_2 = 0.6$ MPa وتستخدم لخلاط تسخين ماء التغذية المتجدد. مواصفات البخار الطازج هي: $p_1 = 13.5$ MPa و$t_1 = 535°C$، ضغط التكاثف $p_3 = 0.006$ MPa.

المطلوب تحديد المردود الحراري η_{th} لمحطة الطاقة البخارية ذات التسخين الأولي لماء التغذية.

الحل

1. من المثال 1.3 ومن أجل محطة الطاقة البخارية بدون تسخين لماء التغذية:

☐ مواصفات البخار الطازج: $p_1 = 13.5$ MPa، $t_1 = 535°C$، $h_1 = 3425$ kJ/kg و $s_1 = 6.54$ kJ /kg K.

☐ للبخار المغادر للعنفة المواصفات التالية: $p_2 = 0.006$ MPa ، $h_2 = 2015$ kJ/kg.

☐ انتالبي الماء المتكاثف عند الضغط p_2: $h'_2 = 2015$ kJ/kg .

العمل النوعي المفيد: $w_u = 1410$ kJ/kg.

الحرارة النوعية المضافة: $q_s = 3273.5$ kJ/kg.

المردود الحراري لمحطة الطاقة البخارية المرجعية: $\eta_{th} = 0.4307$.

الرطوبة النهائية للبخار المغادر للعنفة: $1-x_2 = 0.23$

2. من أجل محطة الطاقة البخارية مع تسخين أولي متجدد لماء التغذية.

- مواصفات البخار الطازج: $p_1 = 13.5$ MPa، $t_1 = 535$°C، $h_1 = 3425$ kJ/kg، $s_1 = 6.54$ kJ/kg
- للبخار المغادر للعنفة (النقطة 2) المواصفات: $p_2 = 0.6$ MPa، $s_2 = 6.54$ kJ/kg، $h_2 =$ 2662.5 kJ/kg (من مخطط h-s).
- الماء المتكاثف من البخار المستنـــزف مواصفاته: $h_2' = 359.93\,\mathrm{kJ/kg}$ (من الجدول 6.A في الملحق)
- البخار المغادر للعنفة (النقطة 3) مواصفاته عند الضغط: $p_3 = 0.006$ MPa، هي $s_3 = 6.54$ kJ/kg، $h_3 = 2015$ kJ/kg.
- للماء المتكاثف من البخار المستنـــزف عند الضغط p_3 يكون: $h_3' = 151.50\,\mathrm{kJ/kg}$.

3. من الموازنة الحرارية لخلاط تسخين الماء الأولي $a\,(h_2' - h) = (1-\mathrm{a})\,(h_3 - h_3')$ ينتج للجزء المستنـــزف من البخار من أجل 1 kg بخار طازج:

$$a = \frac{h'_2 - h'_3}{h_2 - h'_3} = \frac{359.93 - 151.50}{2662.5 - 151.50} = 0.083\mathrm{kg/kg}$$

4. من أجل دورة العمل باستخدام تسخين أولي متجدد للماء ينتج:

العمل النوعي المفيد: $w_\mathrm{u} \approx w_\mathrm{T} = (h_1 - h_3) - a\,(h_2 - h_3)$

$= (3425 - 2015) - 0.083\,(2662.5 - 2015) = 1410 - 53.74$

$= 1356.26$ kJ/kg

والحرارة النوعية المضافة: $q_\mathrm{s} \approx h_1 - h_3' = 3425 - 359.93 = 3065.07$ kJ/kg

وعليه يكون المردود الحراري: $\eta_\mathrm{th} = \dfrac{w_\mathrm{u}}{q_\mathrm{s}} = \dfrac{1356.26\,\mathrm{kJ/kg}}{3065.07\,\mathrm{kJ/kg}} = 0.4425$

5. بمقارنة هذا المردود بمردود دورة البخار المرجعية فإن المردود الحراري يزداد بمقدار:

$$(0.4425 - 0.4307) / 0.4307 \approx 2.74\%$$

مسخنات ماء التغذية من النوع المقفل

تستخدم في العادة خمس إلى تسع مراحل من مسخنات الماء المتجددة بحيث تتراوح درجة الحرارة بين 250 °C و330 °C، وكما ذكرنا سابقاً فإن مسخنات الماء ذات الخلاطات أفضل من

الناحية الترموديناميكية من المسخنات المقفلة، ولكن استخدام عدة خلاطات يتطلب استطاعات عالية للمضخات، ولهذا تستخدم في كثير من الأحيان مسخنات ماء التغذية من النوع المقفل. وتستخدم عندئذٍ مضخة ماءٍ واحدة لضخ الماء من خزان ماء التغذية إلى مولد البخار. تقوم مضخة الماء المتكاثف بضخ هذا الماءَ من المكثف ونقله إلى خزان ماء التغذية، ويكون العمل الذي تستهلكه المضخة في هذه الحالة أقل من العمل اللازم في حالة المسخنات ذات الخلاطات.

الجدير بالذكر بأن خزانات ماء التغذية تقوم بنفس الوقت بدور خلاطات تسخين أولي وساحبات غاز، حيث يتم طرد الأوكسجين من ماء التغذية لتحاشي التآكل في سطوح التسخين الداخلية.

يبيّن الشكل (9.3) خلاطاً من النوع المقفل بشكل تخطيطي. يؤخذ البخار اللازم للتسخين الأولي للماء من أجزاء العنفة الثلاث: ضغط منخفض ـــ ضغط متوسط ـــ ضغط عالي. فمثلاً في مسخن أولي للماء ضغطه متوسط يجري البخار من العنفة وكذلك الماء المتكاثف من المسخن الأولي للماء ذي الضغط العالي، وهكذا يتكاثف البخار في المسخن الأولي للماء وتنتقل الكمية الإجمالية للماء المتكاثف من هذا المسخن الأولي إلى المسخن الأولي ذي الضغط المنخفض أو إلى مكثف العنفة.

يمكن كتابة معادلة التوازن الكتلي بالشكل التالي:

$$m_{BV} + m_{c,ent} = m_{c,exit} \quad [kg/s] \qquad (31.3)$$

حيث: m_{bv} التدفق الكتلي للبخار المستنـــزف من العنفة

$m_{c,ent}$ التدفق الكتلي للماء المتكاثف القادم إلى المسخن

$m_{c,exit}$ التدفق الكتلي للماء المتكاثف المغادر للمسخن.

يجري ماء التغذية في الأنابيب عبر المسخن الأولي بتدفق كتلي m_w فيتسخن من $t_{w,ent}$ إلى $t_{w,exit}$.

عندما همل الضياعات الحرارية، تصبح الموازنة الحرارية للمسخن المقفل (بحسب الشكل 9.3) كما يلي:

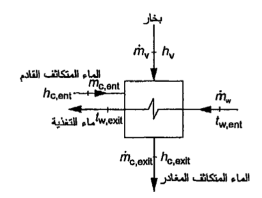
$$\begin{aligned} Q &= m_{BV}\,(h_{BV} - h_{c,exit}) + m_{c,ent}\,(h_{cent} - h_{cent}) \\ &= m_w\, c_{pw}\,(t_{w,exit} - t_{w,ent}) \quad [W] \end{aligned} \qquad (32.3)$$

حيث: h الانتالبي النوعي [kJ/kg]

t درجة الحرارة [°C]

c_{pw} السعة الحرارية النوعية للماء [kJ/kg].

الدلائل تمثل ما يلي: BV البخار المستنـــزف من العنفة (Bleeding Vapour)، c,ent الماء المتكاثف القادم، c,exit الماء المتكاثف المغادر، *W* ماء التغذية، *ent* دخول، *exit* خروج.



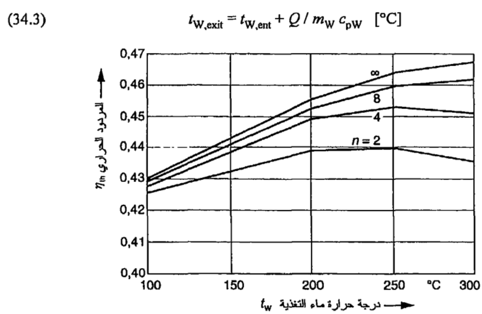
الشكل 9.3 : مخطط المسخنات الأولية المقفلة.

من المعادلة 32.3 ينتج التدفق الكتلي للبخار المستنـــزف:

$$m_v = \frac{m_w\, c_{pw}\,(t_{w,exit} - t_{w,ent}) - m_{c,ent}\,(h_{c,ent} - h_{c,exit})}{h_{BV} - h_{c,exit}} \quad [kg/s] \qquad (33.3)$$

وتنتج درجة حرارة خروج ماء التغذية كما يلي:

$$t_{W,exit} = t_{W,ent} + Q / m_W\, c_{pW} \quad [°C] \qquad (34.3)$$



الشكل 10.3 : تأثير عدد المسخنات الأولية على مردود مولد البخار η_{th}.

يبيّن الشكل (10.3) تأثير عدد المسخنات n على المردود الحراري لدورة البخار. عندما تكون $n = 8$ يكون أس التحسن قد استنفذ عملياً.

مثال 9.3

يطلب تحديد تدفق كتلة البخار الساخن الذي مواصفاته $p_{BV} = 2bar$ و$t_{BV} = 160°C$ وذلك من أجل مسخن أولي لماء التغذية. تعطى من أجل ماء التغذية القيم التالية:

التدفـــق الكتلي للماء $m_w = 500$ kg/s، ضغط الماء $p = 10$ bar وقبل المسخن الأولي معلوم: $t_{w,ent} = 90°C$، $h_{w,ent} = 377.7$ kJ/kg أما بعد المسخن الأولي:

درجة حرارة الماء: $t_{w,exit} = 120°C$، الانتالبـــي $h_{c,exit} = 504.3$ kJ/kg.

قيم تدفق الكتلة، الضغط، الانتالبي للماء المتكاثف الذي يدخل إلى المسخن الأولي اللاحق هي: $m_{c,ent} = 18$ kg/s، $p_c = 4.5$ bar، $h_{c,ent} = 623.16$ kJ/kg.

انتالبي بخار الماء المتكاثف المغادر هو: $h_{c,exit} = 504.78$ kJ/kg.

الحل

1. انتالبي البخار الساخن عند: $p_{BV} = 2$ bar، $t_{BV} = 160°C$ هو:

$$h_{BV} = 2790.2 \text{ kJ/kg}$$

2. من أجل التيار الحراري المتبادل نحصل على:

$$Q = m_w\, c_{pw}\,(t_{w,exit} - t_{w,ent}) = m_w\,(h_{w,exit} - h_{w,eit})$$
$$= 500 \text{ kg/s } (504.3 - 377.7) \text{ kJ / kg} = 63300 \text{ kW}$$

3. من المعادلة 33.3 يمكن حساب التدفق الكتلي للبخار كما يلي:

$$m_{BV} = \frac{m_w(h_{w,exit} - h_{w,ent}) - m_{c,ent}(h_{c,ent} - h_{c,exit})}{h_{BV} - h_{c,exit}}$$
$$= \frac{500(504.3 - 377.7) - 18(623.16 - 504.78)}{2790.2 - 504.78}$$

4.4.3 التحميص الوسطي والتسخين الأولي المتجدد لماء التغذية

يبين الشكل (a11.3) وبشكل تخطيطي محطة بخارية مع تحميص وسطي وتسخين أولي متجدد لماء التغذية، ودورة البخار موضحة على المخطط T,s (b11.3).

يمكن من أجل هذه المنشأة كتابة المعادلات التالية:

ـــ العمل النوعي للعنفة:

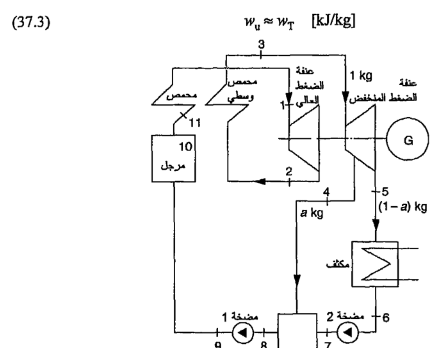
$$w_T = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_5) - a\,(h_4 - h_5) \quad [kJ/kg] \qquad (35.3)$$

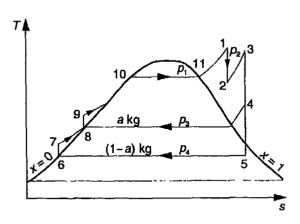
ـــ عمل الانضغاط للعنفة:

$$w_p = (1-a)\,v_4'\,(p_3 - p_4) + v_3'\,(p_1 - p_3) \qquad (36.3)$$
$$= (1-a)\,(h_7 - h_4') + (h_9 - h_3') \quad [kJ/kg]$$

ـــ وبإهمال W_p نجد العمل المفيد:

$$w_u \approx w_T \quad [kJ/kg] \qquad (37.3)$$





الشكل 11.3 : منشأة بخارية ذات تحميص وسطي وتسخين أولي (a) المخطط التسلسلي (b) مخطط T,s.

ومن الموازنة الحرارية لمسخن الماء الأولي:

$$a\, h_4 + (1 - a)\, h_7 = h_8 \qquad (38.3)$$

باعتبار $h_8 = h_3'$ و $h_7 \approx h_4'$ فإن الجزء a من البخار الذي يستنـزف من العنفة للتسخين الأولي لماء التغذية هو:

$$a = \frac{h_8 - h_7}{h_4 - h_7} = \frac{h_3' - h_4'}{h_4 - h_4'} \qquad (39.3)$$

أما الحرارة النوعية المضافة فتحسب كما يلي:

$$q_s = h_1 - h_9 + h_3 - h_2 \approx h_1 - h'_3 + h_2 \quad \text{[kJ/kg]} \qquad (40.3)$$

لحساب المردود الحراري للدورة η_{th} ذات التسخين الأولي المتجدد للماء والتحميص الوسطي تطبق العلاقة التالية:

$$\eta_{th} = \frac{w_u}{q_s} = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_5) - a\,(h_4 - h_3)}{h_1 - h_3' + h_3 - h_2} \qquad (41.3)$$

تستخدم في الحياة العملية كافة طرق تحسين دورة عمل المنشأة البخارية بنفس الوقت، ويتم التسخين الأولي المتجدد عن طريق 5 إلى 8 مراحل، وترفع درجة الحرارة من 250°C إلى 320°C.

مثال 10.3

محطة طاقة بخارية مواصفات بخارها الطازج عند مدخل عنفة الضغط العالي كما يلي: p_1=13.5MPa و t_1 = 535°C ويحصل تحميص للبخار عند p_2 = 3 MPa إلى درجة الحرارة t_3 = 535°C (الشكل a11.3). يتم التسخين الأولي لماء التغذية عند ضغط p_3 = 0.6 MPa (الشكل b11.3). ضغط المكثف p_4 = 0.006 MPa.

كيف يتغير المردود الحراري لهذه المحطة مقارنة بالمحطة البخارية التي لا تحوي تسخيناً أولياً للماء (انظر مثال 7.3).

الحل:

1. من أجل المنشأة ذات التحميص الوسطي وبدون تسخين أولي للماء (من المثال 7.3) نجد:

للنقطة 1: p_1= 13.5 MPa، t_1 = 535°C، h_1= 3425 kJ/kg، s_1 = 6.54 kJ/kg.

للنقطتين 2 و 3 (التحميص الوسطي): p_2 = 3 MPa ، h_2 = 2990 kJ/kg، h_3 = 3535 kJ/kg.

للنقطتين 4 و5 (المكثف): p_3 = 0.06 MPa، h_4 = 2258 kJ/kg، s_4 = 7.33 kJ/kg، h_3'=151.5kJ/kg.

العمل النوعي المفيد والحرارة المضافة وكذلك المردود الحراري لهذه الدورة هي:

w_u = 1712 kJ/kg، q_s = 3818.5 kJ/kg، η_{th} = 0.4483

2. من أجل المنشأة البخارية ذات التحميص الوسطي والتسخين الأولي المتجدد للماء فإن القيم عند النقاط 1 و2 و3 هي نفسها الواردة في المثال (7.3).

3. مميزات البخار المستنـــزف من العنفة (النقطة 4) عند الضغط p_3 = 0.6 MPa هي h_4 = 3043 kJ/kg، s_4 = 7.33 kJ/kg، وللبخار المغادر للعنفة (النقطة 5، قبل المكثف) عند p_4= 0.006 MPa هي h_5 = 2258 kJ/kg ويمكن قراءتها من مخطط موليبه (h-s) لبخار الماء.

4. عند p_4 = 0.006 MPa فإن الإنتالبي النوعي للسائل المتكاثف بعد المكثف (النقطة 6) يؤخذ من الجدول 6.A في الملحق وهو: $h_6 = h'_4$ = 151.5 kJ/kg.

5. وبشكل مشابه فإن للماء في نقطة الإشباع وعن الضغط p_3 (النقطة 8):

$h_8 = h'_3$ = 359.93 kJ/kg.

6. تحسب كمية البخار المأخوذة من كل 1 kg بخار طازج للتسخين في مسخن الماء الأولي من الموازنة الحرارية للمسخن الأولي لماء التغذية كما يلي:

$$a = \frac{h'_3 - h'_4}{h_4 - h'_4} = \frac{359.93 - 151.50}{3043 - 151.50} = 0.072\ \text{kg}$$

7. بسبب استنـــزاف البخار يصبح العمل المفيد أقل مما لو كانت الدورة بدون تسخين أولي متجدد للماء ويصبح العمل المفيد:

$$w_u = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_5) - a\,(h_4 - h_5)$$
$$= (3425 - 2990) + (3535 - 2258) - 0.072\,(3043 - 2258)$$
$$= 435 + 1277 - 58.59 = 1655.4\ \text{kJ/kg}$$

أما الحرارة المضافة إلى دورة العمل منسوبة إلى 1 kg بخار فهي:

$$q_s \approx (h_1 - h'_3) + (h_3 - h_2)$$
$$= (3425 - 359.93) + (3535 - 2990) = 3065.07 + 545$$
$$= 3610.07 \text{ kJ/kg}$$

8. المردود الحراري للمنشأة البخارية عند إجراء تحميص وسطي وتسخين أولي متجدد لماء التغذية:

$$\eta_{th} = w_u / q_R = 1655.4 / 3610.07 = 0.459$$

9. بالمقارنة مع محطة الطاقة المذكورة في المثال 7.3 يُلاحَظ ازدياد في المردود الحراري قدره:

$$(0.459 - 0.44) / 0.44 \approx 4\%$$

5.3 استطاعة الخرج والمردود الإجمالي لمحطة طاقة بخارية

ضياعات الطاقة

تنشأ في كل محطة طاقة بخارية ضياعات في مولد البخار، وأنابيب البخار الطازج، وفي العنفة وفي المولدة. كذلك تنخفض الاستطاعة المفيدة للمنشأة بالإضافة إلى ما ذكر بفعل الاستهلاك الذاتي للطاقة لتشغيل المضخات والمراوح والمطاحن (للوقود الصلب) ولمعدات التنظيف... إلخ وتتحدد ضياعات الطاقة بقيم المردود الموافقة.

وتتألف ضياعات مولد البخار من: ضياعات الاحتراق التي تحصل بسبب عدم احتراق جزء من الوقود وانطلاق H_2, CO وفحوم هيدروجينية مع غازات الاحتراق، وتواجد فحم الكوك (كربون) في الخبث (2 إلى 15 % من حرارة الوقود Q_F)، وضياعات الاحتراق المحسوسة للخبث (حوالي % 0.5 من Q_F)، وضياعات الإشعاع والحمل من السطح الخارجي لمولد البخار (0.5 إلى 2% من Q_F)، والضياعات الحرارية مع غازات الاحتراق (5 إلى 15% من Q_F). يتراوح مردود مولدات البخار η_{SG} لمحطات الطاقة ذات الاستطاعة العالية بين 90 و 93%.

تنشأ ضياعات الحركة بفعل مرور البحار وانتقاله ضمن الأنابيب، ويبلغ هبوط الضغط فيها 3 إلى 8 % من ضغط مولد البخار. وتنشأ في العنفة البخارية ضياعات داخلية وخارجية.

تنشأ الضياعات الداخلية بفعل عدم العكوسية (ضياعات الاحتكاك والخنق، الخروج، والانفصال، والصدمة في المراحل الأخيرة للعنفة وخاصة عندما تكون الرطوبة النهائية عالية...إلخ) عند التمدد في العنفة. يُضاف (يسترجع) جزء من الضياعات الداخلية في العنفة ثانية إلى البخار على شكل حرارة (إنتاج انتروبي) وهي تقلل هبوط الإنتالبي Δh_T للعنفة وترفع انتالبي البخار المغادر

للعنفة. ويتم التعبير عن انخفاض العمل المفيد مقارنة بالعملية المثالية بالمردود الداخلي للعنفة η_{iT}. يبلغ هذا المردود لعنفات الضغط العالي والمتوسط 89 إلى 93 %. أما للعنفات البخارية ذات الضغط المنخفض فهو أقل (87 إلى 90 %) بفعل رطوبة البخار النهائية. أما الضياعات الخارجية للعنفة فيعبر عنها بالمردود الميكانيكي η_m (91 إلى 99.5 %). يبلغ مردود المولدة الكهربائية 0.985 في المولدات ذات الاستطاعة الكهربائية $p_{el} = 100$ إلى 300 MW ويبلغ 0.99 في المولدات باستطاعة $p_{el} = 500$ إلى 1000 MW.

ومردود الوصل للعنفة البخارية ينتج من:

$$\eta_C = \eta_{iT}\ \eta_m \qquad (42.3)$$

حيث: η_{it} المردود الداخلي للعنفة

η_m المردود الميكانيكي للعنفة.

المردود الفعلي لربط محطة الطاقة (المنشأة البخارية)

$$\eta_C = P_C / Q_V = \eta_{th}\ \ \eta_{iT}\ \eta_m \qquad (43.3)$$

حيث: P_C الاستطاعة المقدمة في موقع الوصل بالمولدة (الاستطاعة الفعلية التي تقدمها العنفة البخارية)

Q_V الاستطاعة الحرارية التي يقدمها البخار الطازج للعنفة.

استطاعة خرج المولدة (على أقطاب المولدة)

هي الاستطاعة المقدمة من المولدة P_{el}:

$$P_{el} = m_v\ \Delta h_t\ \eta_{iT}\ \eta_m\ \eta_G \qquad (44.3)$$

حيث: m_v التدفق الكتلي للبخار الطازج

Δh_t الهبوط الايزونتروبـــي للانتالبـــي في العنفة

η_{iT} المردود الداخلي للعنفة

η_m المردود الميكانيكي للعنفة

η_G مردود المولدة.

الاستطاعة الكهربائية الصافية P_{el} لمحطة الطاقة التي استهلاكها الذاتي P_{is} هي:

$$P_{el} = P_{cl} - P_{is}\quad [kW] \qquad (45.3)$$

المردود الإجمالي

يحسب المردود الإجمالي لمحطة الطاقة كما يلي:

$$\eta_{tot} = P_{el} / Q_F = \eta_{SG}\, \eta_{th}\, \eta_{iT}\, \eta_m\, \eta_G\, \eta_{Tr}\, \eta_{is} \qquad (46.3)$$

حيث: η_{SG} مردود مولد البخار (حوالي 0.9 إلى 0.92)

η_{th} المردود النظري لدورة العمل (حوالي 0.4 إلى 0.45)

η_{iT} المردود الداخلي للعنفة (حوالي 0.9)

η_m المردود الميكانيكي للعنفة مع علبة سرعة (عند وجودها 0.97 إلى 0.99)

η_G مردود المولدة (0.985 إلى 0.99)

η_{Tr} مردود المحوِّلة

η_{is} المردود الذي يراعي الاستهلاك الذاتـــي للطاقة في المحطة.

يبلغ المردود الوسطي لمحطات الطاقة ذات الوقود الاحفوري (المستحاثي) وبدون مراعاة الاستهلاك الذاتي للطاقة في الوقت الحاضر حوالي 38%.

في ألمانيا صممت خلال السبعينات (من القرن العشرين) معظم محطات الطاقة البخارية للوحدات ذات الاستطاعة 300 إلى 750 MW والتي يجري تحميص بخارها وسطياً حتى تصبح مواصفاته 180 إلى 190 530°C/bar بحيث تحرق الفحم الحجري والوقود السائل والغاز. تصمم محطات الطاقة البخارية في الوقت الحاضر من أجل المواصفات التالية للبخار المحمص: 240 إلـــى 260 bar و540 إلى 560 °C، استطاعات الوحدة تقع في المجال 700 إلى 1000 MW.

وفي الولايات المتحدة الأمريكية تهيمن المحطات البخارية ذات المواصفات التالية للبخار المنتج: $p_V = 165$ bar (ضغط البخـــار الطـــازج)، $t_v = 538$°C (درجة حرارة البخـــار الطـــازج) $t_{RH} = 538$°C (درجة حرارة التحميص الوسطي).

أكبر قيم لمواصفات البخار في محطة طاقة بخارية في العالم ذات تحميص وسطي مزدوج (RH_1 و RH_2) هي في محطة Eddystone في أمريكا (USA) التي بنيت عام 1959 وهذه المواصفات هي: للبخـــار الطازج 649 °C, bar = 340 (V)، للتحميص الأولي (RH_1) 566 °C، للتحميص الثاني (RH_2) 566 °C استطاعـــة الوحدة 325 MW، الاستهلاك النوعي للحرارة 4860 kJ/kg والمردود 42.6 %.

أما في المنشآت اليابانية فالمواصفات هي 538 °C و246 bar للبخار الطازج، وللتحميص الوسطي حتى 566 °C. استطاعة الوحدة تتراوح بين 500 و1000 MW.

ضياعات الطاقة عند التحميل الجزئي والإقلاع والمباشرة بالإيقاف

تتألف عملية التشغيل من المراحل التالية: بدء التشغيل ريثما يحدث الإقلاع، الانطلاق من بدء عمل حراقات الالتهاب حتى وصل المولدة بالشبكة، البدء بالتوقف ثم التوقف. عند الإقلاع أو بدء التوقف تنشأ ضياعات إضافية: ضياعات بسبب الوقود، ضياعات البخار، ضياعات الاستهلاك الذاتي للطاقة، وضياعات الماء. والوحدات المخصصة للحمولة الوسطى وحمولة الذروة تقلع وتتوقف أكثر من غيرها. والتشغيل عند الحمولات الجزئية يقلل المردود أيضاً. بعد حدوث أعطال في مولد البخار يتم إقلاع المحطة على البارد.

نميز بين إقلاع حار وإقلاع ساخن وإقلاع بارد. فعندما لا تتجاوز فترة توقف المحطة 8 ساعات يكون الإقلاع من النوع الحار، حيث يبقى في هذه الحالة كل من مولد البخار، أنابيب التوصيل، العنفة البخارية ومجمل الدورة حاراً. إذا وصل وقت التوقف عن العمل حتى 25 ساعة يصبح الإقلاع بعدئذ ساخناً حيث يكون مولد البخار وأنابيب التوصيل ساخنين أما العنفة فتظل حارة.

عند الإقلاع البارد يكون المولد بارداً والعنفة ساخنة أو باردة، ويصل وقت التوقف عندئذ حتى 35 ساعة. عند إيقاف مولد البخار 150 إلى 200 مرة في السنة يزداد استهلاك الوقود السنوي بحدود 2%.

مثال 11.3

ما هي قيمة مردود الوصل (الربط) الفعلي والمردود الإجمالي لمحطة طاقة استطاعتها الكهربائية 900 MW؟ المراديد المختلفة هي: مردود مولد البخار 0.92.

- المردود الحراري $\eta_{th} = 0.5$
- المردود الداخلي للعنفة $\eta_{iT} = 0.9$
- المردود الميكانيكي $\eta_m = 0.99$
- مردود المولدة مع المحوِّلة 0.985.

أما الاستهلاك الذاتي لمحطة الطاقة فهو $P_{is} = 63$ MW أو 7 % من الاستطاعة الكهربائية.

الحل

1. المردود الذي يراعي الاستهلاك الذاتـــي لمحطة الطاقة:

$$\eta_{is} = 1 - 0.07 = 0.93$$

2. المردود الفعّال لمحطة الطاقة:

$$\eta_C = \eta_{th}\ \eta_{iT}\ \eta_m = 0.5 \times 0.9 \times 0.99 = 0.45$$

3. المردود الإجمالي لمحطة الطاقة:

$$\eta_{tot} = \eta_{SG}\ \eta_{th}\ \eta_{iT}\ \eta_m\ \eta_G\ \eta_{Tr}\eta_{is}$$
$$= 0.92 \times 0.5 \times 0.9 \times 0.99 \times 0.985 \times 0.93 = 0.38$$

6.3 الاستهلاك النوعي للوقود وللحرارة في محطة طاقة بخارية

يستخدم لتقدير جودة طاقة بخارية الاستهلاك النوعي للوقود *Sfc* (Specific Fuel Consumption)، والتدفق النوعي للبخار *svc*، والاستهلاك النوعي للحرارة C_q. يحسب الاستهلاك النوعي للحرارة في المحطة البخارية Cq_{sp} أو في مجموعة العنفة Cq_T (العنفة والمولدة).

يُحسب الاستهلاك النوعي للوقود لمحطة طاقة بخارية كما يلي:

$$sfc = 3600\ m_F / P_u \quad \text{[kg لكل kWh طاقة كهربائية]} \qquad (47.3)$$

حيث: m_F استهلاك الوقود [kg/s]

P_u الاستطاعة المفيدة لمحطة الطاقة [kW].

تستخدم كـــ P_u كلّ من الاستطاعة الفعّالة للربط بالعنفة P_c، واستطاعة ربط المولدة P_{cl} (على أقطاب المولدة) والاستطاعة الكهربائية الصافية P_{el}، وذلك للتعويض في المعادلة (47.3). يحسب الاستهلاك النوعي للحرارة في المحطة البخارية كمايلي:

$$Cq_{sp} = 3600\ Q_F / P_u = 3600\ m_F\ LCV / P_u \quad \text{[kJ لكل kWh طاقة كهربائية]} \qquad (48.3)$$

حيث: Q_F التدفق الحراري [kJ/s] الذي يحمله معه الوقود المحترق

LCV القيمة الحرارية الدنيا للوقود [kJ/kg]

η_{sp} مردود محطة الطاقة.

ترتبط قيم المردود η_{sp} والاستهلاك النوعي للحرارة Cq_{sp} في المحطة بالعلاقة التالية:

$$\eta_{sp} = 3600 / Cq_{sp} \quad (49.3)$$

يتضمن الجدول 6.3 قيماً استرشادية للاستهلاك النوعي للحرارة لمحطات الطاقة التكثيفية ذات الاستطاعة الكهربائية P_{el} من 100 حتى 800 MW.

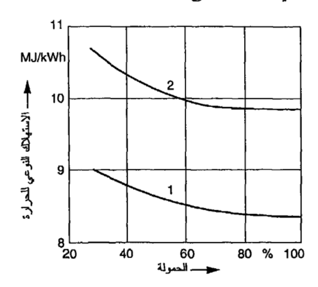
الجدول 6.3 : الاستهلاك النوعي للحرارة Cq_{sp} لمحطات الطاقة التكثيفية. ضغط المكثف 0.04 bar

[MW] Pel	100	200	400	630	800
$(°C/bar) t_V/p_V$	*540/100	540/125	540/165	540/185	540/250
[kJ/kWh]Cqsp	8700	8100	7800	7750	7500
* بدون تحميص وسطي					

وللاستهلاك النوعي للبخار تطبق العلاقة التالية:

$$SVC = 3600\, m_V / P_u \quad [kg/kWh] \quad (50.3)$$

حيث: m_v التدفق الكتلي للبخار الطازج.



الشكل 12.3 : الاستهلاك النوعي للحرارة Cq_{sp} في العنفة البخارية (1) وفي محطة الطاقة البخارية (2) عند الحمولة الجزئية.

يحسب الاستهلاك *النوعي للحرارة* [kJ/kg] Cq_T للعنفة بدون تحميص وسطي أو معه:

بدون تحميص وسطي:

$$Cq_T = 3600\, m_v (h_V - h_{FW}) / P_u \quad (51.3)$$

مع تحميص وسطي:

$$Cq_{T,RH} = 3600\,[m_v(h_v - h_{FW}) + m_{RH}\,\Delta h_{RH}]\,/\,P_u \quad (52.3)$$

حيث: m_v التدفق الكتلي للبخار الطازج [kg/s]

h_v أو h_{FW} الانتالبي النوعي للبخار الطازج وماء التغذية [kJ/kg]

m_{RH} التدفق الكتلي للبخار في المحمص الوسطي [kg/s]

Δh_{RM} ارتفاع انتالبي البخار في المحمص الوسطي [kJ/kg].

يبين الشكل 12.3 الاستهلاك النوعي للحرارة للعنفة البخارية (1) ولمحطة الطاقة البخارية (2) وذلك تبعاً لنسبة التحميل.

مثال 12.3

ما هي قيمة الاستهلاك النوعي للوقود والحرارة في محطة طاقة تحرق الفحم استطاعتها الكهربائية $P_{el} = 900$ MW إذا كان المردود الإجمالي للمحطة $\eta_{tot} = 0.42$ والقيمة الحرارية الدنيا للفحم الحجري 32 MJ/kg؟

الحل

1. ينتج الاستهلاك النوعي للحرارة من أجل محطة الطاقة من العلاقة:

$$Cq_{sp} = 3600\,/\,\eta_{tot} = 3600\,/\,0.42 = 8571 \text{ kJ/kg}$$

2. الاستهلاك النوعي للوقود في المحطة:

$$m_F = \frac{Cq_{sp}\,P_{el}}{LCV} = \frac{2.381\text{MJ}/\text{MJ} \times 900\text{MW}}{32\,\text{MJ}/\text{kg}}$$
$$= 66.97\,\text{kg/s} = 66.97 \times 3.6 = 241.1\,\text{t/h}$$

3. الاستهلاك النوعي للوقود في المحطة

$$sfc = \frac{3600\,m_F}{P_{el}} = \frac{3600\text{s/h} \times 66.97\,\text{kg/s}}{900}$$
$$= 0.268\,\text{kg/kWh}$$

7.3 الاستهلاك الذاتي لمحطة طاقة بخارية

يتألف الاحتياج الذاتي للمحطة من طاقة تشغيل المضخات والمراوح ومعدات تصفية (فلترة) غازات الاحتراق ومعدات التغذية بالفحم* ونفخ الهباب وسحب الرماد وتشكل طاقه تشغيل المراوح والمضخات جزءاً كبيراً من الاستهلاك الذاتي للمحطة.

تستخدم في المحطات البخارية مراوح لامتصاص الهواء النقي، وهي تسحب الهواء اللازم للاحتراق عبر مسخن الهواء الأولي. للتأثير على عملية الاحتراق يقسم هواء الاحتراق إلى تيارات جزئية (هواء أولي، ثانوي، ثالثي). عند إحراق مسحوق الفحم تقوم مراوح الهواء الأولي بنقل الفحم مع جزء من هواء الاحتراق، والجزء الباقي من هواء الاحتراق يتم سوقه عن طريق مراوح إلى المواقع المطلوبة من حجرة الاحتراق.

تقوم مراوح الامتصاص بتحريك غازات الاحتراق عبر مولد البخار ومعدات التصفية وغازات الاحتراق حتى وصولها إلى المدخنة.

اختيار المضخات

تستخدم في محطات توليد الطاقة أنواع مختلفة من المضخات: مضخة مياه التغذية ومضخات الماء المتكاثف الرئيسية والثانوية، ومضخات ماء التبريد، ومضخات تدوير الماء..إلخ. مضخات التغذية بالماء (مضخات نابذة متعددة المراحل) تزود مولد البخار بالماء وتشغل بمحركات كهربائية. مضخة التغذية بالماء الرئيسية تُغذّى بالحركة عن طريق عنفة بخارية.

يجب على آلة الجريان التي يتم اختيارها تأمين التدفق الحجمي V. العوامل التصميمية لمضخة ما هي: التدفق الحجمي V [m³/s]، ارتفاع الضخ H [Pa]، درجة حرارة المائع t [°C]، سرعة الدوران، مردود المضخة η_p ومردود المحرك الذي يديرها η_M.

تحسب استطاعة تشغيل مضخة من العلاقة التالية:

$$P = \frac{V\,H}{\eta_P\,\eta_M} \quad [W] \qquad (53.3)$$

القيم الاسترشادية للمراديد η_P بين 0.65 و0.85 و$\eta_M = 0.9$.

يحسب التدفق كما يلي:

* أو أي نوع آخر من الوقود – المترجم.

$$V = m\,v \quad [m^3/s] \qquad (54.3)$$

حيث: m التدفق الكتلي للمائع (ماء تغذية المولد، الماء المتكاثف أو ماء التبريد) [kg/s]

v الحجم النوعي $[m^3/kg]$.

من أجل مضخة التغذية بالماء تحدد قيمة v للماء عند الضغط ودرجة الحرارة السائدين في خزان الماء.

تستخدم في دورة الماء والبخار مضخات لماء التغذية وللبخار المتكاثف. المضخة النابذية الرئيسية المستخدمة للماء المتكاثف تضخ هذا الماء من المكثف وتمرره في مسخن الماء الأولي ذي الضغط المنخفض وتنقله إلى خزان ماء التغذية، ومن هناك يضخ الماء إلى مسخن الماء الأوّلي ذي الضغط العالي ثم إلى مولد البخار. يتم تصميم مضخة التغذية بالماء بناءً على القواعد المستخدمة في آلات الجريان وعلى حساب دورة عمل الماء والبخار لمحطة الطاقة. في البداية يُحدَّد خط مقاومة جملة التغذية بالماء وكذلك خط مقاومة مضخة التغذية بالماء عند سرعة الدوران الأعظمية.

يحسب الضغط اللازم لمضخة مياه التغذية $p_{t,FW}$ عن طريق الفرق بين ضغط البخار (p_V) عند مخرج مولد البخار وضغط الماء (p_{FW}) في خزان ماء التغذية، وبمراعاة ضياعات الضغط في مسخن الماء الأوّلي ذي الضغط العالي Δp_{PH} وفي مولد البخار Δp_{SG} وفي أنابيب البخار الساخن Δp_{pipe}:

$$p_{t,FW} = p_V - p_{FW} + \Delta p_{SG} + \Delta p_{PH} + \Delta p_{pipe} \qquad (55.3)$$

يتألف ضياع الضغط من ضياع الضغط بفعل الاحتكاك في الأنابيب المستقيمة ومن مجموع ضياعات الضغط بفعل المقاومات المختلفة. أما ارتفاع الضخ للمضخة فيحسب من العلاقة:

$$H = p_{t,FW} - H_s - p_{stat} \quad [Pa] \qquad (56.3)$$

حيث: $p_{t,FW}$ الضغط اللازم للمضخة

H_S ارتفاع الوصول إلى المضخة (محسوباً بالـ Pa)

p_{stat} الضغط الستاتيكي في خزان ماء التغذية.

مثال 13.3

لتحديد استطاعة تشغيل مضخة مياه التغذية معلوم ما يلي:

ماء التغذية: التدفق الكتلي $m_{FW} = 637.4$ kg/s، درجة الحرارة $t_{FW} = 180°C$، الحجم النوعي $v_{FW} = 0.0010018$ m³/ kg، الضغط اللازم للمضخة $p_{t,FW} = 318.7$ bar، الضغط الستاتيكي لخزان

ماء التغذية $p_{stat} = 11.2$ bar، ارتفاع وصول الماء إلى المضخة $H_s = 1.2$ ومردود المضخة η_P يساوي 82 %. ومردود المحرك الذي يديرها $\eta_M = 90$ %.

الحل:

ارتفاع الضخ لمضخة مياه التغذية ينتج كما يلي:

$$H = P_{t,Fw} - P_{stat} - H_s = 318.7 - 11.2 - 1.2$$
$$= 306.3 \text{ bar} = 30.63 \text{ MPa}$$

الاستطاعة اللازمة لتدوير مضخة مياه التغذية:

$$P_{FW} = \frac{m_{FW}\, v_{FW}\, H}{\eta_P \eta_H} = \frac{637.4 \text{kg/s} \times 0.0010018 \text{m}^3/\text{kg} \times 30.63 \text{MPa}}{0.82.0.9} = 26.5 \text{MW} \quad (53.3)$$

الجدول 7.3: سرعة الجريان للبخار والماء والغازات

الوسيط	v بالـ m/s
بخار ساخن	60 - 35
بخار مشبع	25 - 15
ماء	2 - 0.5
الغازات	10 - 5

يحوي الجدول (7.3) قيماً استرشادية لسرعة الجريان لكل من البخار والماء والغازات.

اختيار المراوح

تستخدم في محطات الطاقة غالباً المراوح القطرية والمراوح المحورية المتساوية الضغط أو ذات الضغط المرتفع. أهم عناصر تصميم المراوح هي التدفق الحجمي V [m³/s]، ارتفاع الجر H [Pa]، درجة الحرارة t [°C] للمائع، مردود المروحة η_G (بناء على سرعة الدوران) ومردود محرك التشغيل η_M. القيم الاسترشادية لمردود المروحة η_F تتراوح بين 0.7 و0.8 (تبعاً لسرعة لدوران) ولمحرك التشغيل $\eta_M = 0.9$.

تحسب استطاعة تشغيل مروحة ما كما يلي:

(57.3)
$$P = \frac{V H}{\eta_F \eta_M} \quad [W]$$

يحسب تدفق الهواء النقي للمروحة كما يلي:

(58.3)
$$V = \lambda\, V_{A,min}\, m_F\, (273 + t_A) / 273 \quad [m^3/s]$$

حيث: λ عامل زيادة الهواء

$V_{A,min}$ الاستهلاك الأصغري للهواء من أجل 1 kg وقود $[m^3/kg]$

m_F التدفق الكتلي للوقود [kg/s]

t_A درجة حرارة الهواء [°C].

ومن أجل مراوح غازات الاحتراق فإن التدفق الحجمي يحسب من العلاقة التالية:

(59.3)
$$V = m_F\, [V_{G,L} + (\lambda_G - 1)\, V_{A,min}]\, (273 + t_G) / 273 \quad [m^3/s]$$

حيث: $\lambda_{G,L}$ عامل زيادة الهواء لغازات الاحتراق بمراعاة الهواء المتسرب (Leakage)

V_G تدفق غازات الاحتراق بالنسبة لـ 1 kg وقود $[m^3/kg]$

t_G درجة حرارة غازات الاحتراق [°C].

تُحدَّد قيمة ارتفاع الجر H عن طريق معرفة ضياع الضغط من جهة الهواء أو الغازات لمولد البخار.

الاستهلاكات الأخرى للطاقة

لتغذية المنشأة بالفحم وسحب الرماد منها وكذلك لمعدات تنظيف غازات الاحتراق (الفلتر الكهربائي) يُقدَّر استهلاك الطاقة وفقاً للخبرات المكتسبة. ويتم حساب الاستطاعة اللازمة لكل التجهيزات المساعدة هذه كما يلي:

(60.3)
$$P_{other} = \sum a\, P_{el} \quad [W]$$

حيث: a الاستطاعة النوعية اللازمة بالنسبة لـ 1 MW من استطاعة المولدة [W/MW].

يتراوح الاستهلاك الذاتي لمحطة الطاقة البخارية للمعدات المختلفة بالنسبة لاستطاعة المولدة بين 1.5 و4 % من أجل مضخات التغذية بالماء وبين 0.5 و2 % لمضخات ماء التبريد وحوالي 0.8 إلى

1.4 % للمراوح ومعدات تنظيف غازات الاحتراق ويبلغ حوالي 0.5 % للتجهيزات الصغيرة الباقية (كالمطاحن... إلخ).

8.3 الطرائق المتطورة للاستفادة من الفحم

الهدف من هذه الطرائق المتطورة هو رفع مردود المحطة الطاقة وتقليل انبعاثات CO_2 والغازات الضارة الأخرى بحيث تبقى التكاليف معقولة.

يمكن ملاحظة تطور المردود من خلال القيم التالية:

ـــ لمحطات الفحم الحجري تكون القيمة الوسـطية 36 %، والهدف المخطط لـه هو الوصول إلى 45 %.

ـــ لمحطات الفحم البني القيمة الوسطية 33 % أو 28 % والهدف المخطط له هو الوصول إلى 43 %.

يتم رفع مردود محطة البخار عن طريق:

- □ تحسين المردود الداخلي للعنفة بواسطة تحسين عمليات الجريان داخل العنفة.
- □ تقليل الضياعات في غازات احتراق مولد البخار.
- □ تحسين ما يسمى النهاية الباردة (ضغط المكثف، درجة حرارة ماء التبريد).
- □ تقليل الاستهلاك الذاتي للطاقة في المنشأة.

هناك محطات طاقة قيد التشغيل مثل محطة Staudinger 5 ومحطة روسترك Rostock اللتان تعملان بالفحم الحجري ومردودهما حوالي 43 %، وهناك محطة Schkopau التي تعمل بالفحم البني التي مردودها 40 % وهناك محطات جديدة قيد الإنشاء لحرق الفحم البني هي: Schwarze Pumpe، Lippendorf وFlimmersdorf*.

من أجل المحطات التي تحرق الفحم البني وذات الوحدات التي تتراوح استطاعتها بين 600 و 100 MW يمكن أن يصل المردود إلى حوالي 43 % وذلك عن طريق تقليل الاستهلاك الذاتي (للمضخات، لمراوح السحب، لمراوح الهواء النقي، لمعدات سحب الكبريت) بحدود 1.4 % وتقليل الضياعات في دورة الماء والبخار بحدود 1.1 % وللنهاية الباردة بـحدود 1.4 %، للعنفة البخاريـة 1.7 %، تحسين الدورة عن طريق التسخين الأولي لماء التغذية بحدود 1.1 %... إلخ، وبالإجمال حوالي 7%.

---

* هذه المحطات في ألمانيا – المترجم.

هناك مـــواد (معادن) حديثة مثل P 91 تمكن من رفع درجة مواصفات البخـــار الطازج إلى 270 bar و 580 °C والتحميص الوسطي إلى 50 bar و600 °C.

ومن الممكن رفع المردود الإجمالي لمحطة الطاقة التي تحرق الفحم إلى 45 % (للمنشآت التي مرجلها من النوع ذي التدوير القسري) وإلى 46 % (للمنشآت التي مرجلها ذو جريان أحادي في الدارة). هذا من أجل الفحم الحجري أما من أجل الفحم البني فيمكن رفع المردود إلى 42 وحتى 43 %.

بتخفيض درجة حرارة غازات الاحتراق حتى 105 °C وتحسين تمرير البخار على شفرات العنفة يمكن رفع المردود حتى 47 % من أجل الفحم الحجري وحتى 45 % من أجل الفحم البني.

الجدير بالإشارة أن المحطات ذات البخار الذي مواصفاته دون حدية أي الضغط 160 bar ودرجة الحرارة 530 حتى 540 °C كان مردودها 30 إلى 36 %. من أجل أول محطة طاقة من الجيل الجديد (1991 في Boxberg) ذات الاستطاعة 800 MW للوحدة الواحدة والتي تفوق مواصفات بخارها الشروط الحدية، أي لبخارها الطازج ضغط 260 bar ودرجة حرارة 545 °C والتحميص الوسطي يتم عند 55 bar و560°C وضغط المكثف لها 0.046 bar، يبلغ المردود الصافي لهذه المحطة 39 % (بمراعاة الاستهلاك الذاتي للطاقة). ويجري الآن بناء أول محطة ذات وحدتين استطاعة كل منهما 800 MW في Schwarze Pumpe.

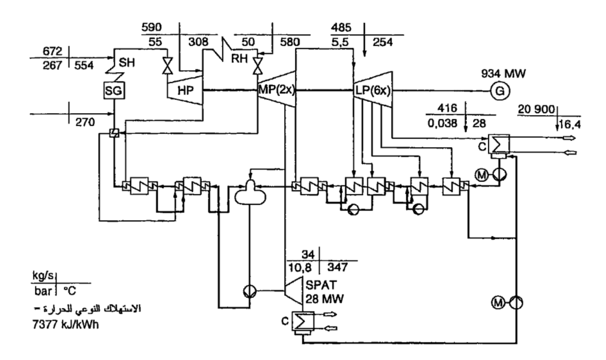
أما في محطة Lippendorf التي تحرق الفحم البني (الشكل 13.3) فتستخدم وحدات باستطاعة 900 MW للحمولة الأساسية، حيث يبلغ عدد ساعات الاستخدام عند الحمولة الكاملة 6000 إلى 7500 ساعة في العام. المميزات الأساسية لهذه المحطة هي:

- ☐ مجال التحكم يتراوح بين 40 و 100 % من الحمولة.
- ☐ تحقيق الحدود المسموح بها لإصدار الغبار ولـــ SO_2، والانخفاض إلى ما دون الحد المسموح به في إصدار NO_x، أي أقل من 200 mg/m^3 عند 6 O_2 %، وذلك عن طريق استخدام إجراءات أولية في الاحتراق.
- ☐ سحب أكاسيد الكبريت وإنتاج الجص (الجبصين).
- ☐ تغليف غاسل غازات الاحتراق بخلائط أساسها Ni-Ba واختيار GfK لأقنية الغاز المنظف.
- ☐ تمرير غازات الاحتراق حول أبراج تبريد ذات سحب طبيعي.
- ☐ توليد غازات الاحتراق حول أبراج تبريد ذات سحب طبيعي.

□ توليد البخار بتحميص وسطي، وتمتع البخار بمواصفات فوق حدية.

□ تحقيق الاستطاعة المطلوبة مع تحكم يحقق تدرجاً في الضغط.

تستخدم لتوليد البخار مراجل ذات جريان قسري أحادي في الدورة ارتفاعها 163 m (مراجل برجية)، أما المجرى الثانـــي فهو خال.



الشكل 13.3 : مخطط الجريان في محطة Lippendorf، SG مولد بخار، SH محمص، RH محمص وسطي، HP عنفة الضغط العالي، HP عنفة الضغط العالي، MP عنفة الضغط المتوسط، LP عنفة الضغط المنخفض، SPAT عنفة تشغيل مضخات المكثف ومضخات مياه التغذية، C مكثف.

تقانة الإحراق الأمثل للفحم البني

حتى عام 1997 أمكن رفع المردود لـــ 70 % من المحطات ذات الاستطاعات العالية التي تحرق البني الموجودة* بحدود 3.5 %، وبذلك تم إنقاص انبعاث الـــ CO_2 بمقدار مليوني طن في العام. وفي عام 1999 كان من المفترض أن تبدأ محطة ذات تقانة حديثة (وحدة توليد واحدة) في Frimmersdorf تحرق الفحم البني واستطاعتها 900MW، وبذلك سيرتفع المردود وسطياً من 30%

* في ألمانيا — المترجم.

إلى 43 %، وسيكون انبعاث الـــ CO_2 أقل بــــ 2.1 مليون طن في السنة، تتضمن التقانة الحديثة هذه ما يلي:

- رفع مواصفات البخار الطازج من 170 bar/530°C (دون حدي) إلى 260 حتى 285 و580°C (فوق حدي).
- تخفيض ضغط المكثف حتى 0.034
- استخدام الطرق الأفضل لجريان البخار وتمدده في العنفة البخارية
- الاستخدام الأنسب لحرارة غازات الاحتراق عن طريق جمل المبادلات الحرارية، وهناك جملتان اثنتان موصولتان على التوازي، الأولى لتسخين ماء التغذية (ECO) والأخرى بعد المصفاة الكهربائية مصنوعة من خيوط صناعية لتسخين هواء الاحتراق تسخيناً أولياً
- التخفيض الكبير للاستهلاك الذاتي للطاقة عن طريق أنسب اختيار للعناصر المختلفة ووصلها.

وبالمقارنة مع محطات الطاقة القائمة التي تحرق الفحم البني فقد بُنيت بالاستعانة بالتقانة السابقة الذكر وحدات توليد تحرق الفحم باستطاعة صافية قدرها 900 MW وتتمتع بالمقارنة مع الوحدات ذات الاستطاعة 600 MW بمردود أعلى بمقدار 7.7 % أي حوالي 43 %.

المواصفات التصميمة للوحدة ذات الاستطاعة 900 MW في Neurath مبينة في الجدول (8.3).

الجدول 8.3: المواصفات الفنية لوحدة توليد تحرق الفحم البني استطاعتها 880 MW.

1. الوقود

الفحم البـــني بتركيب (كنسب وزنيـــة [%]) كما يلي: C = 29.4، H = 2.2، O = 10.6، S = 0.4، N = 0.4، A = 4.6 ، W = 52.4، LCV = 9700 kJ/kg،

غازات الاحتـــراق (كنسب حجميـــة %) عندمـــا λ = 1.15 هي CO_2 = 20.51، O_2 = 2.45، H_2O = 14.7، N_2 = 61.22

2. مولد البخار (SG، مراجل بنسون Benson)

استطاعة الاحتراق 1723 MW، الاستطاعة الحرارية لمولد البخار 1600 MW

مردود مولد البخار η_{SG} = 1600 MW / 1732 MW = 92.38%.

البخار الطازج المولَّد: m_v = 3334 t/h، p_1 = 260bar، t_1 = 550°C.

الضغط قبل مولد البخار 311.2 bar، ضياع الضغط 51.2 bar.

التحميص الوسطي عند p = 46.5 bar و t = 580°C.

3. جملة العنفة والمولد (Turboset)

العنفة: واحدة ذات ضغط عالٍ HP، واحدة ذات ضغط متوسط MP، 6 مراحل ذات ضغط منخفض LP.

الاستطاعة الميكانيكية المفيدة 894.3 MW.

المردود الداخلي للعنفة $\eta_{iT} = 0.926$.

الاستطاعة الكهربائية لخرج المولدة 880 MW.

الاستهلاك الذاتي للطاقة 44.6 MW.

الاستطاعة الكهربائية الجاهزة (الصافية) $P_{Netto} = 835.4$ MW.

4. المردود والاستهلاك النوعي للحرارة في المنشأة (منسوباً لـ P_{Netto})

$Cq_{sp} = 8416.4$ kJ/kWh ، $\eta_{el} = 42.78$ %

5. الاستهلاك الذاتي للطاقة في المنشأة

مضخة مياه التغذية 26.6 MW، مروحة الهواء النقي 4.9 MW، مراوح امتصاص غازات الاحتراق 8.1 MW المطحنة 7.5 M.

6. التسخين الأولي لماء التغذية

هناك 4 مسخنات أولية عند ضغط منخفض من أجل تدرج قدره 3 K، خزان لماء التغذية، ساحب غازات، مسخنان اثنان أوليان عند ضغط عالٍ (A6 من أجل تدرج قدره 1.8K وA7 من أجل تدرج قدره 2K–، ساحب للحرارة مركب ومصمم لضمان الوصول إلى درجة الحرارة 270 °C لماء التغذية عند مدخل المرجل).

7. التكثف وبرج التبريد

الاستطاعة الحرارية المطروحة 952.7 MW، ضغط المكثف 34.2 mbar، نسبة الجفاف للبخار المغادر للعنفة $X_{end} = 0.884$ هناك برجا تبريد ارتفاع كلٍ منهما 162 m؛ مجال التبريد 9 K، عرض مناطق التبريد 8.16 K، التدفق الكتلي لماء التبريد $m_{CW} = 27876$ kg/s، تدفق الهواء الكتلي $m_A = 27926$ kg/s، التدفق الكتلي للبخار المتطاير $m_{eva} = 259$ kg/s عند درجة حرارة محيطية $t_{amb} = 9.5$°C

الخلاصة

يمكن رفع مردود دورة البخار عن طريق زيادة درجة الحرارة الوسطية لتقديم الحرارة وتخفيض درجة الحرارة الوسطية لطرح الحرارة. يتم تحقيق ذلك هندسياً عن طريق رفع الضغط P_V ودرجة الحرارة T_V وكذلك عن طريق استخدام التحميص الوسطي والتسخين المتجدد كثير المراحل للماء الذي يغذي المرجل. درجة الحرارة الوسطية لطرح الحرارة هي درجة حرارة التكاثف التي تتحدد عن طريق ضغط المكثف ودرجة حرارة ماء التبريد فيه.

إن رفع P_V يرفع المردود الحراري ولكنه يؤدي إلى ازدياد استطاعة تشغيل مضخة مياه التغذية. يمكن عن طريق رفع درجة حرارة البخار المولّد ودرجة حرارة التحميص (t_{RH}, T_v) وكذلك عن طريق الانتقال من التحميص الأحادي إلى التحميص في مرحلتين رفع المردود الحراري بمقدار 1.2 إلى 2%.

إن الجريان الأمثل للبخار في العنفة شرط مهم لزيادة إضافية للمردود الداخلي للعنفة وبالتالي المردود الإجمالي لمحطة الطاقة. كذلك يساهم تقليل الاستهلاك الذاتي للطاقة في المنشأة نفسها بشكل جوهري في رفع المردود الصافي للمحطة. يكون التحسن في استغلال طاقة الوقود كبيراً فقط عند استخدام محطة الدارة المركبة (بخارية + غازية). تقع قيم المردود التي يمكن الوصول إليها في المجال 58 إلى 60 %، وستتم في الفصول القادمة معالجة فرضيات هذه المحطات المبتكرة التي تعمل بالوقود المستحاثي (الأحفوري) إذا أنها تمثل جيلاً جديداً من محطات الطاقة التي هي في انتشار متزايد.

4 مولدات البخار (المراجل - الغلايات)

1.4 الأنواع

المرجل ومولد البخار

تقسم المراجل (الغلايات) ومولدات البخار بشكل عام إلى:

ـــ المراجل ذات الحيز الكبير للماء.

ـــ مولدات البخار الأنبوبية.

تصنّع المراجل ذات الحيز الكبير للماء على شكل مراجل ذات أنابيب لهب وغازات احتراق، وباستطاعة تصل حتى 25 t/h وضغط البخار المشبع حتى 25 bar. إن نسبة كمية الماء في المرجل إلى التدفق الكتلي للبخار المولد عالية جداً، وتمتلك هذه المراجل قدرة كبيرة على التخزين. وعند تغير الحمولة تحصل تغيرات صغيرة في الضغط. يمكن رفع درجة حرارة البخار حتى 450 °C وتحميصه بواسطة محمص خاص. تستخدم هذه المراجل عادة في المنشآت الصناعية والحرفية.

أما في محطات الطاقة فتستخدم مولدات البخار الأنبوبية حصراً. ويمكن تصنيعها لتقدم أعلى الاستطاعات وأكبر القيم للضغط ودرجات حرارة البخار. يتم في هذه المولدات توليد البخار في أنابيب المبخر التي تشكل جدار وحزمة التسخين في المولد.

تقسم مولدات البخار الأنبوبية إلى مولدات ذات تدوير طبيعي وذات تدوير قسري وذات جريان وحيد قسري.

مولدات البخار ومنشأة مولدة البخار

يتألف مولد البخار من حجرة احتراق وسطوح تسخين لتوليد البخار وتحميصه وكذلك للتسخين الأولي لكل من ماء التغذية والهواء، أي من مبخر ومحمص ومحمص وسطي وحاقن ماء تبريد البخار، والموفر (Eco) ومسخن الهواء الأولي. يمكن توزيع مولد البخار في عدة مجارٍ على طول مجرى الغازات، وهناك نوع ذو مجرى واحد وأنواع ذات مجارٍ متعددة. يتم ترتيب المولدات

ذات المجريين بحيث يوجد في المجرى الأول حجرة احتراق يشكل المبخر جدارها الغشائي (membrane) وتحوي أيضاً محمصاً ذا ضغط عالٍ، أما في المجرى الثانـــي فتوجد سطوح التسخين الأخرى للتسخين اللاحق.

تتضمن منشأة البخار بالإضافة إلى مولد البخار الأجزاء التالية:

ــ تجهيزات تحضير وتوزيع الوقود،

ــ مراوح الهواء النظيف ومراوح السحب،

ــ المسخنات الأولية للماء (الموفرات) في مجرى غازات الاحتراق للمولد،

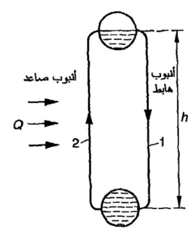
ــ مضخات ماء التغذية، والملحقات وأنابيب الماء،

ــ تجهيزات تخفيض الضغط وكذلك أنابيب التوصيل إلى مولد البخار،

ــ معدات سحب أكاسيد الكبريت والآزوت،

ــ المدخنة.

ويؤثر نوع الوقود المستخدم على شكل المنشأة وتصميمها وعملها بشكل كبير.

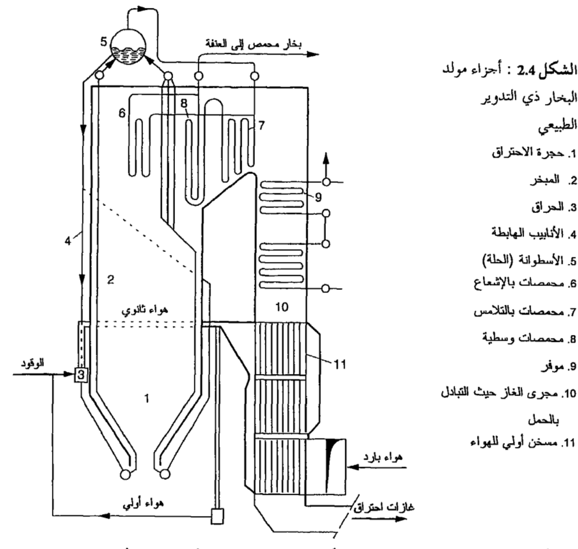


الشكل 1.4 : دورة الجريان في مولد البخار ذي التدوير الطبيعي (تخطيطياً).

مولدات البخار ذات التدوير الطبيعي

تنشأ في هذه المولدات الحركة الدورانية للماء بفعل فرق الكثافة بين الماء الساخن والماء البارد، وتعادل قوة التدوير هذه مقاومة الجريان داخل الدورة. تتألف دورة العمل من أنابيب صاعدة مسخنة ومجمع توزيع، وأسطوانة (حلّة) وأنابيب هابطة غير مسخنة (الشكل 1.4) يتبخر الماء جزئياً في الأنابيب الصاعدة ثم يخرج خليط الماء والبخار من الأنابيب الصاعدة ليذهب إلى الأسطوانة

(الحلة)، وهناك ينفصل الماء عن البخار. يجري البخار إلى المحمص، أما الماء فينتقل عبر الأنابيب الهابطة إلى المجمعات ومنها يتوزع على أنابيب المبخر الصاعدة.



الشكل 2.4 : أجزاء مولد البخار ذي التدوير الطبيعي

1. حجرة الاحتراق
2. المبخر
3. الحراق
4. الأنابيب الهابطة
5. الأسطوانة (الحلة)
6. محمصات بالإشعاع
7. محمصات بالتلامس
8. محمصات وسطية
9. موفر
10. مجرى الغاز حيث التبادل بالحمل
11. مسخن أولي للهواء

تكون كثافة خليط الماء والبخار في الأنابيب الصاعدة التي تشكل المبخر، أقل من كثافة الماء في الأنابيب الهابطة. إن قوة التدوير منسوبة لـ $1 \; m^2$ من مقطع الأنبوب تساوي ضياع الضغط في الدورة وهي تحسب بالعلاقة التالية:

$$\Delta p = g\,(\rho_F - \rho_S)\,H \quad [Pa] \qquad (1.4)$$

حيث: g التسارع الأرضي $[m/s^2]$

ρ_F كثافة الماء في الأنابيب الهابطة $[kg/m^3]$

ρ_S كثافة خليط الماء والبخار في الأنابيب الصاعدة [kg/m³]

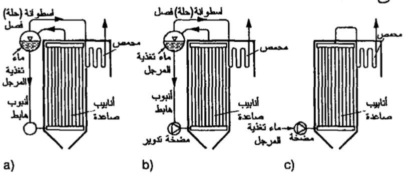
H فرق الارتفاع في الدورة بين الأسطوانة (الحلة) ومجمع التوزيع [m].

من أنواع مولدات البخار ذات التدوير الطبيعي توجد المولدات ذات الأنابيب المائلة وذات الأنابيب الصاعدة والمولدات الإشعاعية. عدد الدورات u لمولد بخار جريانه طبيعي هو النسبة بين تدفق كتلة الماء القادمة إلى المبخر وتدفق كتلة البخار المولّد. يتعلق عدد الدورات u ونسبة البخار x عند مخرج الأنابيب الصاعدة بضغط البخار. تبلغ قيمة u لمولدات البخار ذات التدوير الطبيعي والتي تستخدم الفحم وقوداً 10.8 أو 6 عند ضغط للبخار 10.14 أو 18 MPa. وتكون عندئذ قيمة x مساوية لـ 0.09 أو 0.13 أو 0.16.

يجب أن تكون سرعة الجريان في الأنابيب الصاعدة كبيرة بحيث يتم ضمان التبريد الكافي للأنابيب وتجنب الحدود غير المسموح بها لدرجة حرارة جدران الأنابيب. ويجب أن تكون قيمة التدفق الكتلي 600 kg/m² s حتى نضمن تبريداً آمناً لأنابيب المبخر.

! *تبلغ الكثافة العظمى للسيالة الحرارية في مولدات البخار ذات الجريان الطبيعي 0.4 MW/m².*

تعمل مولدات البخار ذات التدوير الطبيعي عند نقطة نهاية ثابتة للتبخر، ولا يمكن استخدامها لقيم بخار (parameters) فوق حدية. يتراوح الضغط بين 170 و180 bar، ويبلغ هبوط الضغط في مولد البخار 5 حتى 10 %.



الشكل 3.4 : مخطط ومبدأ عمل أنواع مولدات البخار الثلاثة (a) ذات التدوير الطبيعي، (b) ذات التدوير القسري، (c) ذات الجريان لمرة واحدة في الدورة بشكل قسري.

المولدات ذات التدوير القسري

يبين الشكل (3.4) مبدأ عمل كل من أنواع مولدات البخار الثلاثة المختلفة وهي: ذات التدوير الطبيعي، ذات التدوير القسري، ذات الجريان لمرة واحدة في الدورة بشكل قسري. يُسمى مولد

البخار ذو التدوير القسري بمرجل لامونت La-Mont وهو يستخدم بشكل كبير في أمريكا ولكنه نادر الاستخدام في أوروبا وبخاصة ألمانيا. تُدعم حركة الوسيط في أنابيب المبخر لهذا النوع من المولدات عن طريق مضخة تدوير للماء وتتم تهدئة الجريان في أنابيب المبخر المختلفة بمساعدة صمامات خنق.

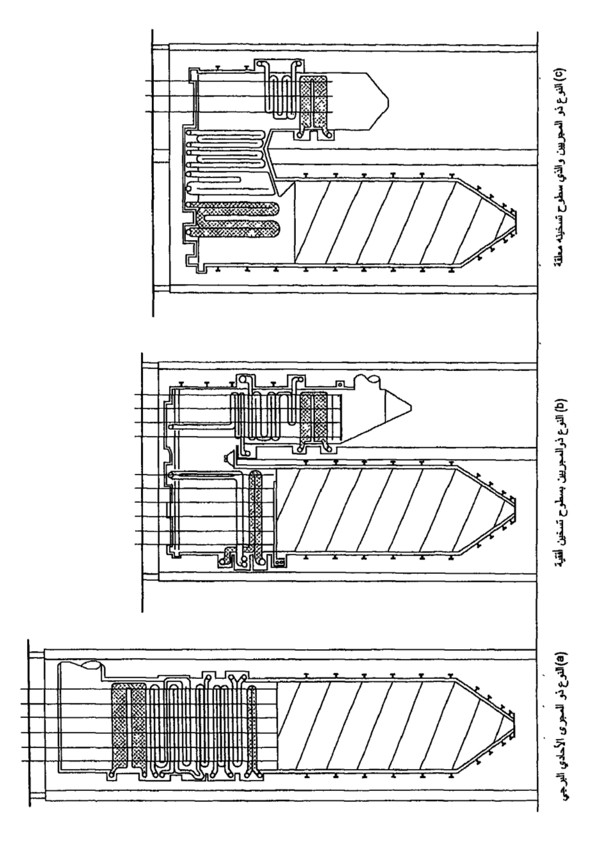
وبفضل مضخة تدوير الماء تصبح كثافة التدفق الكتلي عبر المبخر مستقلة عن استطاعة مولد البخار. تقوم صمامات الخنق علاوة على ما ذكر بالمواءمة بين التدفق الكتلي للماء والتيار الحراري للأنابيب. ويمكن باختيار مناسب للتدفق الكتلي تحاشي نشوء أزمة الغليان عند الضغوط العالية تحت الحدية. يتم تنظيم عمل جملة تدوير الماء بحيث يتراوح عدد الدورات بين 3 و5. ويجري اختيار كثافة التدفق الكتلي في أنابيب المبخر وفقاً لكثافة السيالة الحرارية القصوى في حجرة الاحتراق وللضغط، وتُختار قيمة كثافة التدفق الكتلي في أنابيب المبخر لتتراوح بين 1000 و2000 $kg/m^2 s$.

> *يبلغ الضغط المسموح به في أسطوانة الفصل (الحلة) لمولدات البخار ذات التدوير القسري حوالي 200 bar.*

مولدات البخار ذات الجريان لمرة واحدة في الدورة وبشكل قسري

هنالك نوعان من هذه المولدات هما: مولد بخار سولزر Sulzer ومولد بخار بِنسون Benson. يتميز مرجل بنسون بأنه ذو مجرى وحيد وبوجود ساحب للرماد الجاف وكذلك بسرعة إقلاعه، ويمكنه العمل عند ضغط أعلى أو أدنى من الضغط الحدي. في المجال الأدنى من الضغط الحديّ يتعلق موقع نقطة نهاية التبخير بحمولة المرجل والحرارة المتلقاة، وكذلك بإنتالبي الدخول ودرجة حرارة البخار الحار. وهكذا تحسب المساحات المتغيرة لسطوح التسخين لكل من المبخر والمحمص. تنظم نقطة التبخر عبر جزء انتقالي صغير يتم تسخينه (مبخر نهائي) وبذلك يمكن التشغيل عند أية درجة حرارة خروج للغازات. كما يمكن عند الحاجة تشغيل مرجل بنسون عند مختلف الضغوط، أي أنه مناسب للعمل عند تغير متدرج في الضغط. في مولدات البخار من نوع سولزر يستخدم فاصل للماء.

من أجل مولدات البخار ذات الجريان لمرة واحدة في الدورة وبشكل قسري يُسخن ماء التغذية أولاً في مسخن ماء أولي يستخدم غازات الاحتراق الساخنة (الموفر economizer) . يتبخر الماء في



الشكل 4.4 : مراحل بنسون ذات الجريان القسري لمرة واحدة في الدورة بأنواعها أحادية وثنائية المجرى.

مبخر تتوضع أنابيبه بشكل حر وبسيط نسبياً على جدران حجرة الاحتراق. وهكذا يتم تحول مستمر للماء إلى بخار عند أعلى الضغوط (حتى 350 إلى 400 bar أخيراً يُسخن البخار في محمص ذي ضغط عالٍ ريثما يصل إلى درجة حرارة البخار الطازج المطلوبة. تتعلق درجة الحرارة هذه بمادة صنع كل من المحمص وأنابيب البخار الطازج وشفرات العنفة، وهي تقع حالياً بحدود الـ 560 °C. إن ضغط البخار في هذا النوع من مولدات البخار غير محدود من وجهة النظر الفيزيائية ولذلك يُستخدم هذا النوع من المولدات حصراً للضغوط التي قيمتها أعلى من الضغط الحدي. هناك حمولة دنيا لا يجوز النـــزول عنها وذلك لضمان التدفق الكتلي الأصغري اللازم لتبريد الأنابيب ولتأمين استقرار الجريان، وهذا عيب مولدات البخار ذات الجريان لمرة واحدة في الدورة وبشكل قسري، إلا أنه يمكن تحاشي هذه المشكلة بتركيب معدات خاصة من أجل الإقلاع والحمولات الصغيرة.

الشكل (4.4) يبيّن بشكل تخطيطي أنواع مولدات البخار هذه بتصاميمها ذات المجرى الوحيد أو ذات المجريـــين. كذلك يبيّن الجدول (1.4) مقارنة لحجوم هذه المولدات.

الجدول 1.4: مقارنة حجوم مولدات البخار ذات الجريان القسري لمرة واحدة في دورة المبخر (الوقود فحم بنـــي)

استطاعة المجموعة MW	عدد المراجل	معدل توليد البخارلكل مرحلة t/h	الارتفاع الكلي m	ارتفاع حجرة الاحتراق
500	2	815	73	42
600	1	1800	*130	66
930	1	2420	163	103

* الارتفاع الكلي لمولد البخار الذي استطاعته 630 MW والذي يستخدم الوقود السائل (فيول أويل) يبلغ 70 m فقط.

مقارنة الأنواع المختلفة لمولدات البخار

عيوب المولدات ذات التدوير الطبيعي:

- ☐ حدود ضغط البخار هي 180 bar.
- ☐ تكاليف الأسطوانة (الحلّة) عالية من أجل الاستطاعات والضغط الكبير، فمثلاً يجب أن تتراوح سماكة جدار الأسطوانة بين 150 و 200 mm.
- ☐ السلوك الديناميكي غير مناسب.

يعرض الجدول (2.4) مجالات الضغط عند مخرج المبخر وقبل العنفة والتي تناسب عملياً للاستعمال في الأنواع المختلفة من مولدات البخار.

الجدول 2.4: مجالات الضغط عند مخرج المبخر وقبل العنفة لمختلف طرق توليد البخار

نوع مولد البخار	ضغط الخروج من المبخر [bar]	ضغط البخار الطازج [bar]
المولدات ذات التدوير الطبيعي	180	160
المولدات ذات التدوير القسري	195	170
المولدات ذات الجريان القسري لمرة واحدة في الدورة والمزودة بفاصل للماء	210	185
المولدات ذات الجريان القسري لمرة واحدة في الدورة غير المزودة بفاصل للماء	فوق حدي (>221.2bar)	فوق حدي (>221.2bar)

2.4 الموازنة الحرارية والمردود

تيار الحرارة الداخل

تتألف كمية الحرارة الناتجة عن حرق العقود من الحرارة الناتجة عن الارتباط الكيميائي والحرارة المحسوسة للوقود والحرارة المحسوسة لهواء الاحتراق. يُحسب تيار الحرارة المتحررة في حجرة الاحتراق بالمعادلة التالية:

$$Q_s = m_F \left[LCV + c_F (t_F - 25) + A\, c_{PA} (t_A - 25) \right] \quad [kJ/s] \qquad (2.4)$$

حيث: m_F التدفق الكتلي للوقود [kg/s]

LCV القيمة الحرارية للوقود [kj/kg]

c_F السعة الحرارية النوعية للوقود [kJ/kgK]

c_{tA} السعة الحرارية النوعية للهواء [kJ/m³K]

t_F و t_A درجة حرارة الوقود وهواء الاحتراق على التوالي [°C]

A كمية هواء الاحتراق المقابلة لكل 1 kg وقود [m³/kg].

تعتمد الدرجة 25 °C كدرجة حرارة مرجعية للموازنة الحرارية. إذا لم يسخن الوقود أو الهواء قبل الاحتراق ينعدم الحدان الثاني والثالث في المعادلة 2.4.

استطاعة البخار والاستطاعة الحرارية المفيدة

تعرف استطاعة البخار لمولد بخار بأنها كمية البخار التي يتم إنتاجها في واحدة الزمن ويُرمز لها بـ m_V وواحداتها [kg/s] أو [t/h] (طن/ساعة)

أما الاستطاعة الحرارية المفيدة Q_u لمولد بخار فهي مجموع كميات الحرارة المقدمة في الثانية لتوليد البخار (Q_V) ولتحميصه الوسطي (Q_{RH}):

$$Q_u = Q_V + Q_{RH} \quad [kJ/s] \tag{3.4}$$

في المنشآت الكبيرة تضبط درجة حرارة البخار الطازج (عند مخرج مولد البخار) عن طريق حقن جزء من مياه التغذية لتبريد البخار.

تبلغ الحرارة اللازمة لتوليد البخار من مياه التغذية (FW) كما يلي:

$$Q_V = m_V (h_V - h_{FW}) + m_{iW} (h_{FW} - h_{iW}) \quad [kJ/s] \tag{4.4}$$

أما الحرارة اللازمة للتحميص الوسطي للبخار فهي:

$$Q_{RH} = m_{RH} (h_{RH,exit} - h_{RH,ent}) + m_{W,RH} (h_{FW} - h_{W,RH}) \quad [kJ/s] \tag{5.4}$$

حيث: m التدفق الكتلي [kg/s]

h الانتالبي النوعي [kJ/kg].

أما الدلائل فتعني ما يلي: V بخار نقي، RH تحميص وسطي، FW ماء التغذية، iw الماء المحقون لتبريد البخار الطازج، W,RH الماء المحقون لتبريد البخار المحمص وسطياً، ent للدخول، exit للخروج.

مردود مولد البخار

يعرف مردود مولد البخار η_{SG} بأنه النسبة بين الاستطاعة الحرارية المفيدة Q_u للمولد وتيار الحرارة الداخلة إليه Q_s:

$$\eta_{SG} = Q_u / Q_s \tag{6.4}$$

وبطريقة غير مباشرة:

$$\eta_{sG} = (Q_s - Q_{los}) / Q_s = 1 - Q_{los} / Q_s \tag{7.4}$$

تتألف الضياعات الحرارية الإجمالية لمولد البخار Q_{los} من الضياعات الحرارية مع غازات الاحتراق Q_{EG} والضياع الحراري بفعل عدم الاحتراق الكامل Q_{Lim}، والضياع الحراري بسبب الأجزاء غير المحترقة من الوقود Q_{FS} (كمية الكربون في الوقود) والتي تتطاير مع الهباب أو تترسب مع الخبث، والضياع الحراري بفعل الحرارة المحسوسة للخبث Q_s، والضياع بفعل الحمل والإشعاع Q_c.

عن نسب هـــذه الضياعات الحرارية بعد قسمتها على الحرارة المضافة هي (كنسبة مئوية %): q_c، q_s، q_{FS}، q_u، q_G.

ويحسب المردود الحراري للمولد كما يلي:

$$\eta_{SG} = 100 - (q_G + q_u + q_{FS} + q_s + q_c) \quad [\%] \tag{8.4}$$

تزيد قيمة المردود الحراري للمولدات الحديثة ذات الاستطاعات الكبيرة عن 90 %.

الضياع الحراري مع غازات الاحتراق

يتعلق الضياع الحراري مع غازات الاحتراق بدرجة الحرارة t_G والتدفق الحجمي للغازات V_{Gas}.

يحسب التدفق الحجمي للغازات كما يلي:

$$V_{Gas} = m_F\,(V_{EG} + \Delta\,\chi\,A_{min}) \quad [m^3/s] \tag{9.4}$$

حيث: m_F استهلاك الوقود في حجرة الاحتراق [Kg/s]

V_{EG} حجم الغازات في حجرة الاحتراق [m³/kg]

$\Delta\chi$ عامل الإغناء بالهواء بفعل ما يسمى السحب (الامتصاص) الخاطئ للهواء بعد حجرة الاحتراق

A_{min} كمية الهواء الدنيا اللازمة نظرياً لحرق 1 kg وقود [m³/kg].

ويصبح الضياع الحراري مع غازات الاحتراق (عند درجة حرارة مرجعية للوسط المحيط هي 25°C) كما يلي:

$$Q_{EG} = V_{Gas}\, c_{PG}\,(t_c - 25) \quad [kJ/s] \tag{10.4}$$

الضياع الحراري بفعل الاحتراق غير الكامل للوقود

عندما يكون الاحتراق غير كامل فإن غازات الاحتراق تحوي غازات قابلة للاحتراق (CO، حبيبات كربون) ويبلغ الضياع الحراري الناتج عن ذلك:

$$Q_u = V_{Gas} - r_{CO}\, m_F\, H_{CO}\, R_{Gas}/R_{CO} \quad [kJ/s] \tag{11.4}$$

حيث: V_{Gas} حجم الغازات المنطلقة من احتراق 1 kg وقود [m^3/kg]

m_F استهلاك الوقود [kg/s]

r_{CO} نسبة حجم غاز CO في غازات الاحتراق [m^3/m^3]

H_{CO} القيمة الحرارية لـ CO [$12640\ kJ/m^3$)

R_{Gas} ثابت غازات الاحتراق [kJ/kg K]

R_{CO} ثابت غاز الـ CO

0.2968 kJ/kg = K

الضياع الحراري بسبب عدم الاحتراق

يمكن حساب الضياع الحراري جراء عدم الاحتراق في كلٍ من الرماد المتطاير والخبث المترسب كما يلي:

$$Q_{FS} = A\, m_F\, C_{FS}\, H_C \tag{12.4}$$

حيث: A محتوى الوقود من الرماد [kg/kg]

C_{FS} محتوى كل من الرماد المتطاير والخبث المترسب للكربون

H_C القيمة الحرارية للكربون (33285 kJ/kg).

الضياع الحراري بالحرارة المحسوسة للخبث الصلب أو السائل المطروح:

$$Q_{Sen} = A\, m_F\, a\, (c_S\, t_S + h_S) \tag{13.4}$$

حيث: a النسبة الكتلية للخبث المسحوب (المطروح)

c_S السعة الحرارية النوعية للخبث (بين 0.8 و1.26 kJ/kg K)

t_S درجة حرارة الخبث [°C]

h_S انتالبي الخبث المنصهر (السائل) (قيمته تتراوح بين 200 و420 kJ/kg).

ويمكن إهمال هذا الضياع Q_S في حالة الإحراق الجاف.

الضياع الحراري بفعل التبرد

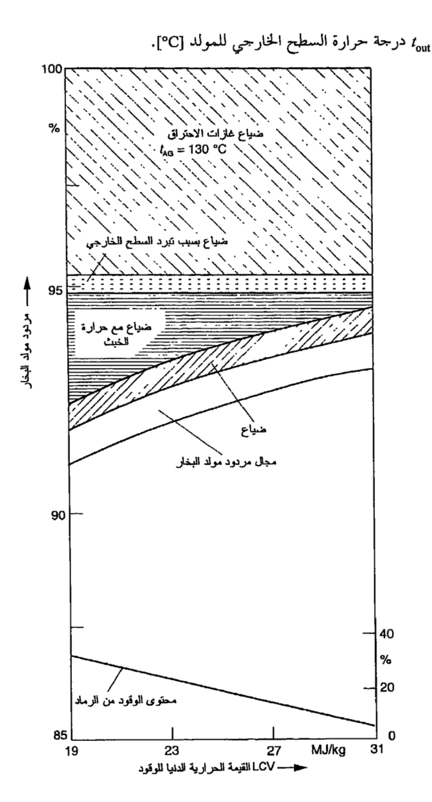
يحسب الضياع الحراري بفعل تبرد السطح الخارجي للمولد جراء الحمل والإشعاع كما يلي:

$$Q_C = (\alpha_c + \alpha_{Rad})\, A_{out}\, (t_{out} - 25) \quad [kJ/s] \tag{14.4}$$

حيث: α_c، α_{Rad} عاملا انتقال الحرارة بالحمل والإشعاع على التوالي [$W/m^2\ K$]

A_{out} مساحة السطح الخارجي للمولد [m^2]

t_{out} درجة حرارة السطح الخارجي للمولد [°C].



الشكل 5.4 : الضياعات الحرارية ومردود مولد بخار يحرق الفحم الحجري وعلاقة ذلك بالقيمة الحرارية الدنيا للوقود LSV.

بازديـــاد الاستطاعـــة الحرارية المفيدة لمولد البخار تتناقص قيمة $q_c = Q_c/Q_s$ من 1.1 % عند $Q_u = 10\ MW$ إلى 0.3 % عند $Q_u = 800\ MW$ وذلك من أجل مرجل يحرق فحماً حجرياً.

يبين الشكل (5.4) الضياعات الحرارية والمردود لمولد بخار يحرق الفحم الحجري وذلك تبعاً للقيمة الحرارية الدنيا للوقود.

3.4 الاحتراق والحراقات

وفقاً لنوع الوقود فإن هناك أنواعاً مختلفة للحراقات ولأسلوب الحرق في مولد البخار. يتم في فرن مولد البخار حرق أنواعٍ مختلفة من الوقود الصلب والسائل والغازي. إن طريقة الحرق وحجم حجرة الاحتراق يتعلقان بنوع الوقود وهما أساسيان في جودة الاحتراق.

> **!** *لحرق قطع الفحم تستخدم المصبعات ولحبيبات مسحوق الفحم الناعمة تستخدم اجهزة حرق ذات تفريغ للخبث بالحالة الجافة أو تستخدم الأفران السيكلونية ذات تفريغ الخبث بالحالة السائلة، أما من أجل حبات الفحم الأكبر حجماً فتستخدم طريقة الحرق بما يمسى فرشة الوقود السائلة** .

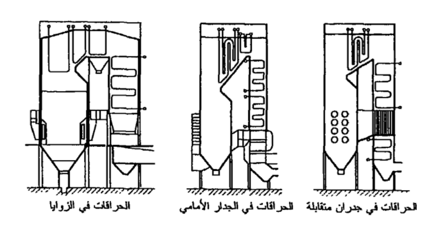
يُحمل الفحم المطحون في مطاحن الفحم عن طريق هواء أولي ريثما يوزع على عدة طرقات. تسحب الكميات الباقية من الاحتراق (الرماد والخبث) من حجرة الاحتراق أو تفصل عن غازات الاحتراق على شكل رماد طيار بواسطة معدّات تصفية (فلترة) خاصة.

يوضح الشكل (6.4) تخطيطياً أنواع حجر الاحتراق ذات سحب الخبث بالحالة الجافة، أما الشكل (7.4) فيبين بشكل تخطيطي حراقاً للفحم المسحوق يرسل إليه الهواء عبر ثلاث مراحل.

يحرق الوقود السائل سواءً الثقيل (فيول أويل) أو الخفيف (غاز أويل ــ مازوت) في حراقات تعتمد على تذرير الوقود أو تغويزه (تحويله إلى غاز). من أجل الوقود السائل الثقيل وعندما يكون أسلوب الحرق غير مناسب يمكن أن تنشأ كمية من الغبار المتطاير على شكل خليط من الهباب والكربون والرماد.

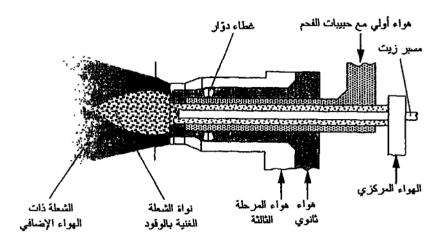
---

* المصطلح الإنكليزي المقابل لتسمية (Wirbelschichtfeuerung) الألمانية هي (Fluidized bed combustion) وترجمة المصطلح الإنكليزي إلى العربية (الاحتراق في فرشة الوقود المميعة)، أما ترجمة المصطلح الألماني فهي (الاحتراق في فرشة الوقود ذات الحركة الدوامية).



الشكل 6.4 : أنواع حجر الاحتراق ذات سحب الخبث بالحالة الجافة.

لإحراق الوقود الغازي، مثلاً الغاز الطبيعي، تستخدم حراقات غاز (في المنشآت الكبيرة حراقات ذات ضغط عالٍ) تحقق إحراقاً بدون مخلفات وقليل من المركبات الضارة.



الشكل 7.4 : حراق مسحوق الفحم.

تحديد مواصفات حجرة الاحتراق

يجب تحديد أبعاد حجرة احتراق مولد البخار بحيث يمكن الحصول على احتراق كامل للوقود عند مختلف ظروف التشغيل، وهذا يعني عند استخدام الفحم البني والحجري وجود حجم كاف لأجزاء الفحم يسمح بالاحتراق الكامل. يجب أن تُختار درجة الحرارة في منطقة الحزام المحيط بالحراقات بحيث لا يتجمع الخبث على جدران حجرة الاحتراق. ولتحاشي التصاق الرماد الذائب على سطوح التسخين يجب أن تكون درجة الحرارة النهائية لحجرة الاحتراق أدنى من درجة حرارة ذوبان الرماد.

استطاعة حرارة الاحتراق هي كمية الحرارة التي تقدم إلى حجرة احتراق مولد البخار مع الوقود وهواء الاحتراق خلال ثانية:

$$Q_F = m_F (LCV + \lambda\, A_{min}\, c_{pA}\, t_A) \quad [MW] \qquad (15.4)$$

حيث: m_F تدفق الوقود الكتلي [kg/s]

LCV القيمة الحرارية الدنيا للوقود [kJ/kg]

λ عامل فائض الهواء

A_{min} كمية الهواء الدنيا اللازمة لإحراق الوقود [m³/kg]

c_{pA} السعة الحرارية لواحدة الحجم من الهواء [kJ/m³ K]

t_A درجة حرارة الهواء [°C].

ومن أجل الحساب التقريبـــي لحجرة الاحتراق يجب معرفة المقادير المميزة التالية:

التحميل الحجمي q_V، التحميل السطحي q_A، والتحميل في الحزام المحيط بالحراقات q_G، وتعريفها كما يلي:

- التحميل الحجمي هو نسبة استطاعة حرارة الاحتراق Q_F إلى حجم حجرة الاحتراق.

$$q_F = Q_F / V_F \quad [MW / m^3] \qquad (16.4)$$

- التحميل السطحي هو نسبة Q_F إلى مقطع حجرة الاحتراق:

$$q_A = Q_F / A_F \quad [MW / m^2] \qquad (17.4)$$

- التحميل في الحزام المحيط بالحراقات هو نسبة Q_F إلى مساحة السطح الخارجي للجدران في مجال تركيب الحراقات A_G:

$$q_G = Q_F / A_G \quad [MW / m^2] \qquad (18.4)$$

تحدد قيمة q_V فترة تواجد الوقود في حجرة الاحتراق ومدى اكتمال احتراقه، أما q_A فتحدد سرعة غازات الاحتراق والقيمة q_G تحدد درجة حرارة الشعلة (اللهب). من أجل مولدات البخار التي تحرق الفحم الحجري تتراوح q_G بين 1 و1.2 MW/m²، وللفحم البني تتراوح بين 1.2 و 1.5 MW/m².

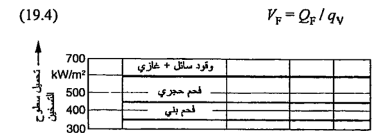
الجدول (3.4) يعطي قيماً استرشادية لـــ q_V وq_A.

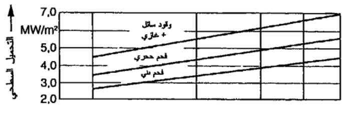
الجدول 3.4: التحميل الحجمي q_V والتحميل السطحي q_A عند حرق الفحم الحجري والبني والوقود السائل والغازي

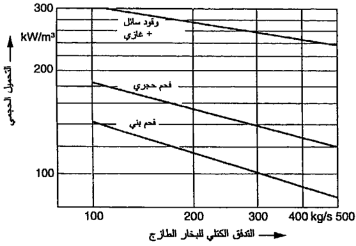
الاستطاعة الحرارية [MW]	q_V [MW/m³] فحم حجري	q_V فحم بني	q_V وقود سائل أو غازي	q_A [MW/m²] فحم حجري	q_A فحم بني	q_A وقود سائل أو غازي
200	0.22	0.20	0.34	3.3	3.0	4.4
400	0.19	0.17	0.31	4.1	3.5	5.6
800	0.16	0.14	0.28	5.2	4.1	3.9
1600	0.13	0.10	0.24	6.3	4.6	8.4

ويحسب الحجم اللازم لحجرة الاحتراق من المعادلة التالية:

$$V_F = Q_F / q_V \qquad (19.4)$$







الشكل 8.4 : التحميل الحجمي والسطحي لحجرة الاحتراق وتحميل سطوح تسخين المبخر وعلاقتها باستطاعة البخار عند استخدام أنواع الوقود المختلفة.

أما مقطع حجرة الاحتراق A_F فيحسب من Q_F وq_A والارتفاع H_F لحجرة الاحتراق كما يلي:

$$A_F = Q_F / q_A \text{ أو } H_F = V_F / A_F \qquad (20.4)$$

يبين الشكل (8.4) التحميل السطحي والحجمي لحجرة الاحتراق وكذلك تحمل سطوح تسخين المبخر وذلك بالنسبة لأنواع الوقود المختلفة. يستخدم تحميل سطوح تسخين المبخر من أجل تحديد مواصفات المبخر.

مثال 1.4

يُعطى من أجل مولد بخار يحرق الفحم البنى ما يلي:

1. الاستطاعة الكهربائية لوحدة التوليد $P_{el} = 730$ MW
2. مردود حجرة الاحتراق $\eta_F = 0.995$
3. تدفق الوقود $m_F = 160$ kg /s
4. عامل فائض الهواء $\lambda = 1.3$، درجة حرارة الهواء $t_A = 300$ °C، السعة الحرارية النوعية للهواء $c_{pA} = 1.3$ kJ / m³K
5. التحميل الحجمي والسطحي على التوالي هما: $q_V = 0.14$ MW/m³ و$q_A = 4.1$ MW/m².

ما هي أبعاد حجرة الاحتراق وما هي الاستطاعة الحرارية لها؟

الحل

1. تبلغ كمية الهواء الدنيا اللازمة لاحتراق الفحم البني الخام $A_{min} = 3.1$ m³/kg والقيمة الحرارية الدنيا له LCV = 9.63 MJ/kg.
2. كمية الحرارة المحمولة إلى حجرة الاحتراق مع كلٍّ من الوقود وهواء الاحتراق:

$$Q_F = m_F (LCV + \lambda\ A_{min}\, c_{pA}\, t_A)$$

$$= 160 \text{ kg /s } (9.63 \text{ MJ/kg} + 1.3 \times 3.1 \text{ m}^3\text{/kg} \times 1.3 \text{ kJ/m}^3\text{K} \times 300 \text{ °C})$$

$$= 2530 \text{ MW}$$

3. حجم ومقطع وارتفاع حجرة الاحتراق تُحسب كما يلي:

$$V_F = Q_F / q_V = 2530 \text{ MW} / 0.14 \text{ MW/m}^3 = 18072 \text{ m}^3$$

$$A_F = Q_F / q_A = 2530 \text{ MW} / 4.1 \text{ MW m}^2 = 617 \text{ m}^2$$

$$H_F = V_F / A_F = 18072 \text{ m}^3 / 617 \text{ m}^2 = 29.3 \text{ m}$$

4. الاستطاعة الحرارية المفيدة تنتج الآن كما يلي:

$$Q_u = Q_F \times \eta_F = 2530 \times 0.995 = 25174 \text{ MW}$$

4.4 مولدات البخار ذات فرشة الوقود ذات الحركة الدوامية

1.4.4 أنواع فرشات الوقود ذات الحركة الدوامية

تستخدم طريقة الطبقة التي تحصل فيها حركة شديدة (فرشة الوقود الدوامية) لحرق الوقود في مولدات البخار منذ عشر إلى خمس عشرة سنة، فهي تمثل تقانة ملائمة للبيئة عند إحراق الأنواع الصلبة من الوقود (الفحم البني والحجري والفضلات). يحدث الاحتراق بهذه الطريقة في مجال لدرجات الحرارة يتراوح بين 850 و950 °C وبانبعاث قليل لأكاسيد الكبريت والآزوت (النتروجين).

فيما يلي سنبحث في هذه التقانة المبتكرة، ولهذا سنستعرض في البداية الجوانب المتعلقة بالجريان وانتقال الحرارة في فرشة الوقود السائلة. تقسم جملة الحبيبات الصلبة والغاز التي تنشأ عن حركة الحبيبات الصلبة نتيجة جريان مائع غازي خلالها (مثل الهواء) الشكل (9.4) إلى:

- فرشة ساكنة (كومة)،
- فرشة متحركة،
- دافع هوائي (تيار متطاير).

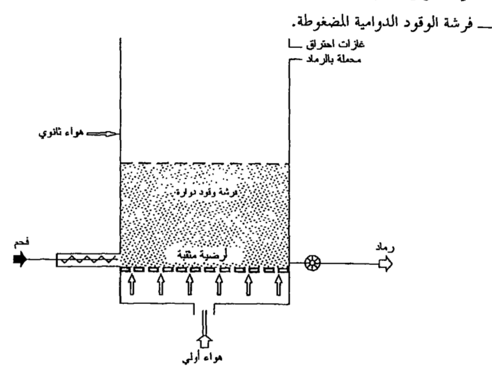
لنلاحظ كومة من الحبيبات الصلبة في جهاز أسطواني أو مكعب، يدخل الغاز من قعره بشكل موزع. تتحرك حبات الكومة بفعل الغاز الداخل من القعر وتزداد سرعتها باستمرار. عند سرعات منخفضة للغاز تحاط الحبيبات الصلبة للكومة بتيار الغاز، وعند سرعة جريان معينة تُدعى سرعة التمييع (التخلخل) الصغرى w_{mf} يتم الانتقال من الفرشة الساكنة إلى الفرشة المتحركة. يستمر اختلاط الحبيبات الصلبة بالغاز وتحركها في الفرشة المتحركة بفعل تيار الغاز بشدة تتعلق بسرعة تيار الغاز، وعند ازدياد سرعة الغاز تكبر المسافة بين الحبيبات الصلبة ويزداد الحجم الإجمالي للفرشة المتحركة أيضاً.

هناك الأنواع التالية من فرشات الوقود ذات الحركة الدوامية:

- فرشة الوقود الدوامية المستقرة والمعرضة للضغط الجوي

ــ فرشة الوقود الدوامية المتحركة

ــ فرشة الوقود الدوامية المضغوطة.



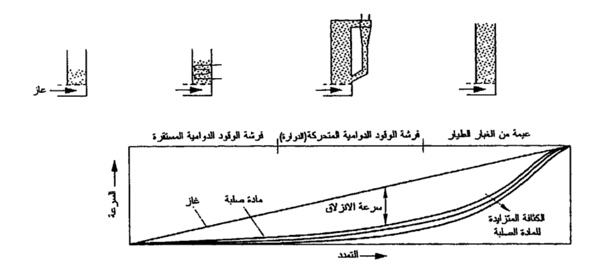
الشكل 9.4 : جملة الحبيبات الصلبة والغاز.

فرشة الوقود الدوامية المستقرة المعرضة للضغط الجوي

تتشكل فرشة الوقود هذه عندما يمرر على كومة من الوقود ذي الحبيبات الصغيرة تيار من الغاز عبر أرضية مثقبة وبحيث تكون سرعة هذا التيار v أعلى من سرعة تخلخل الحبيبات (تمييعها) الصغرى w_{mf} ولكن أصغر من السرعة التي تؤدي إلى انجرار الحبيبات ومغادرتها للحيز الموجودة فيه w_a. يبين الشكل (10.4) بشكل تخطيطي الحرق بطريقة فرشة الوقود الدوامية المستقرة المعرضة للضغط الجوي. يبلغ الضغط في هذه الحالة 1 bar. عندما يكون حجم الحبيبات 2 – 10 mm تتراوح سرعة تيار الهواء المندفع إلى فرشة الوقود الدوامية المستقرة بين 1 و3 m/s (منسوباً لكامل مقطع حجرة الاحتراق).

تتميز فرشة الوقود الدوامية بالعوامل المميزة التالية:

مسامية الفرشة ε، حجم الحبيبات d_p وكتلتها النوعية ρ_p، وسرعة الغاز w (منسوبةً لكامل مقطع الجهاز وهو فارغ) وسرعة الحبيبات w_p وضياع الضغط لفرشة الوقود Δ_p وسرعة الانزلاق w_s أي الفرق بين w و w_p.



الشكل 10.4 : فرشة الوقود ذات الحركة الدوامية المعرضة للضغط الجوي.

المسامية

يُفهم من مسامية فرشة الوقود السائلة ε المسافة النسبية بين الحبيبات:

$$\varepsilon = 1 - V_p / V \qquad (21.4)$$

حيث: V الحجم الكلي لفرشة الوقود الدوامية [m³]

V_p حجم الحبيبات الصلبة في الفرشة الدوامية [m³]

في وضعية تخلخل (تباعد) الحبيبات تكون المسامية مساوية لـ ε_{mf} . تكون قيمة المسامية لفرشة الوقود الدوامية المستقرة أكبر من ε_{mf} (حوالي 0.4) عند سرعة التمييع (تخلخل الحبيبات) الصغرى. عندما تكون $\varepsilon < \varepsilon_{mf}$ تبقى فرشة الوقود مستقرة، وعندما تصبح $\varepsilon \approx 1$ يحدث انتقال للحبيبات عند الضغط الجوي. وفي فرشة الوقود الدوامية المتحركة تكون سرعة الغاز w أكبر من سرعة حبيبات المادة الصلبة w_p، ومع تزايد سرعة الغاز يزداد تمدد ومسامية فرشة الوقود الدوامية ε. تكون سرعة ومسامية كل من الغاز والحبيبات الصلبة في فرشة الوقود الدوامية المستقرة أقل من مثيلاتها في فرشة الوقود الدوامية المتحركة.

قطر الحبيبات الصلبة

يتحدد الحجم الوسطي للحبيبة عن طريق القُطر الوسطي لحبيبة كروية:

$$d_p = (6\, m_p / \pi\, \rho_F)^{1/3} \quad [\mathrm{m}] \qquad (22.4)$$

حيث: d_p قطر الحبيبة [m]

m_p كتلة عينة من الحبيبات [kg]

n عدد الحبيبات في العينة

π قيمة pi تبلغ (... 3.14)

ρ_p الكتلة النوعية للجسم الصلب $[kg / m^3]$.

الأرقام المميزة: سرعة السيلان الصغرى، ضياع الضغط

عند حساب الجريانات في فرشة الوقود الدوامية تستخدم الأرقام اللابعدية المميزة التالية:

☐ رقم رينولدز

$$R_e = w\, d_p / \nu \qquad (23.4)$$

☐ رقم أرخميدس

$$Ar = g\, d_p^3 (\rho_p - \rho) / \rho\, \nu^2 \qquad (24.4)$$

☐ رقم فرود

$$Fr = w / \sqrt{(g\, d_p)} \qquad (25.4)$$

حيث: w سرعة الغاز [m / s]

d_p قطر الحبيبات المكافئ [m]

ν اللزوجة الحركية للغاز $[m^2/s]$

g التسارع الأرضي $(9.81\ m/s^2)$

ρ_p و ρ الكتلة النوعية للحبيبة وللغاز على التوالي

سرعة التمييع الصغرى w_{mf} تحسب بالعلاقة التالية:

$$Re_{mf} = \sqrt{(27.2^2 + 0.0408\, Ar)} - 27.2 \qquad (26.4)$$

$$w_{mF} = Re_{mF}\, \nu / \cdot d_p \quad [m / s] \qquad (27.4)$$

وهكذا تكون قوة الجريان المؤثرة على حبيبة مساوية تقريباً لوزن الحبيبة.

أما هبوط الضغط في فرشة الوقود الدوامية المستقرة فيحسب كما يلي:

(28.4)	$\Delta p = \rho w^2 (H / d_p)(21 + 1750 / Re)$ [Pa]

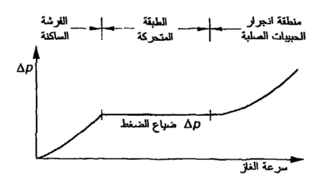
أو:

$$\Delta p = g(\rho_p - \rho) H (1 - \varepsilon)$$

$$= g(\rho_p - \rho) H_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) \quad [Pa] \qquad (29.4)$$

حيث: H أو H_{mf} ارتفاع فرشة الوقود الدوامية عند مسامية ε وفي حالة تخلخل (تباعد) الحبيبات تؤخذ المسامية ε_{mf}.

يبين الشكل (11.4) العلاقة بين هبوط الضغط Δp وسرعة الغاز w لفرشة الوقود الدوامية المستقرة. ومن السهل مشاهدة أن ضياع الضغط في الكومة السفلية الساكنة يزداد مع مربع السرعة w^2 ولكنه يبقى ثابتاً في الطبقة (الفرشة) المتحركة.



الشكل 11.4 : ضياع الضغط Δp في الفرشة الساكنة وفي فرشة الوقود الدوامية المستقرة المعرضة للضغط الجوي.

سرعة انجرار الحبيبات ومغادرتها للحيز الموجودة فيه

هي سرعة الغاز التي تُحمل فيها الحبيبات من فرشة الوقود الدوامية وهي تحسب من المعادلة:

$$w_a = Re_a \nu / d_p$$

$$= 1.74\, Ar\, \nu / d_p (31.3 + \sqrt{Ar}) \quad [m/s] \qquad (30.4)$$

مثال 2.4

ما هي سرعة التمييع الصغرى لحبيبات الفحم التي قطرها الوسطي 1 mm وكتلتها النوعية 1450 kg/m³ عند درجة الحرارة 850 °C والضغط 1 bar؟

ما هو ضياع الضغط لفرشة الوقود الدوامية المستقرة التي ارتفاعها 1.5 m، إذا كانت مسامية الطبقة عند سرعة التمييع الصغرى 0.42؟

مواصفات الهواء عند 850 °C و 1 bar هي:

الكتلة النوعية $\rho = 1.293 \times 273 / (273 + 850) = 0.314$ kg / m³،

اللزوجة الحركية $\nu = 142.65 \times 10^{-6}$ m²/s

الحل

1. رقم أرخميدس

$$Ar = g\, d_p^3 (\rho_p - \rho) / \rho\, \nu^2$$

$$= 9.81 \text{ m/s}^2 (1.10^{-3})^3 \text{ m}^3 \times (1450 - 0.314) \text{ kg/m}^3 / 0.314 \text{ kg/m}^3$$

$$(142.65 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2 = 2225.7$$

2. رقم رينولدز

$$Re_{mf} = \sqrt{(27.2^2 + 0.0408\, Ar)} - 27.2$$

$$= \sqrt{(27.2^2 + 0.0408 \cdot 2225.7)} - 27.2 = 1.62$$

3. سرعة التمييع الصغرى

$$w_{mf} = Re_{mf}\, \nu / d_p$$

$$= 1.62 \times 142.65 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} / 1 \times 10^{-3} \text{ m} = 0.23 \text{ m/s}$$

4. ضياع الضغط لفرشة الوقود التي ارتفاعها 1.5 m ومساميتها $\varepsilon_{mf} = 0.42$ يبلغ

$$\Delta p = g\,(\rho_p - \rho)\, H_{mf}\,(1 - \varepsilon_{mf})$$

$$= 9.81 \text{m}^2/\text{s}\,(1450 - 0.314) \text{ kg/m}^3\ 1.5 \text{ m}\,(1 - 0.42) = 12372.6 \text{ Pa}$$

مثال 3.4

ما هي سرعة انجرار حبيبات الفحم التي قطرها الوسطي 1 mm وكتلتها النوعية 1450 kg/m³ عند درجة الحرارة 850 °C والضغط 1 bar، مواصفات الهواء عند هذا الضغط وهذه الحرارة هي: الكتلـــة النوعية $\rho = 0.314$ kg / m³ اللزوجة الـــحركية $\nu = 142.65 \times 10^{-6}$ m²/s رقم أرخميدس $Ar = 2225.7$.

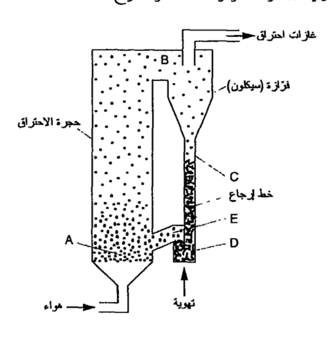
الحل

بتطبيق المعادلة (30.4) نجد سرعة انجرار حبيبات الفحم:

$$w_a = 1.74 \times 2225.7 \times 142.65 \times 10^{-6}\ m^2/s / 1 \times 10^{-3} m$$
$$(31.3 + \sqrt{2225.7}) = 7.04\ m/s$$

فقاعات الغاز

تتميز فرشة الوقود الدوامية بتشكل فقاعات الغاز وهي عادة ذات تركيب غير متجانس. يحدث تمييع المادة الصلبة عن طريق جزء فقط من تيار الغاز الإجمالي، أما الجزء الآخر من تيار الغاز فإنه يمر على شكل فقاعات غاز عبر الطبقة الدوامية، وعملياً تكون فقاعات الغاز حره وخالية من الحبيبات الصلبة، وهي تُساعد على اختلاط الحبيبات. يحدث عند شروط معينة جريان أسطواني للفقاعات يقلل من التبادل الحراري بين فرشة الوقود السائلة وسطوح التسخين.



الشكل 12.4 : مخطط فرشة الوقود الدوامية الدوارة.

فرشة الوقود الدوامية الدوارة

يكون حجم الحبيبات الصلبة في هذه الفرشة أصغر منه في الفرشة المستقرة، وتكون سرعة الغاز أكبر من سرعة انجرار الحبيبات الصلبة (الشكل 12.4). هنا تُحمل الحبيبات من فرشة الوقود وتنتقل إلى فرازة (سيكلون) حيث تفصل هناك عن تيار الغاز ويعاد إرسالها إلى فرشة الوقود. إن توزيع الحبيبات الصلبة على طول الارتفاع في فرشة الوقود الدوامية الدوارة غير متجانس، ويمكن التمييز بين منطقتين، إحداهما تكون كثافة المادة الصلبة فيها عالية ويكون ارتفاعها عدة أمتار فوق الأرضية

المثقبة، والمنطقة الأخرى بارتفاع عدة أمتار أخرى فوق المنطقة الأولى تكون حمولتها من الحبيبات الصلبة قليلة.

يستخدم في فرشة الوقود الدوامية الدوارة فحم يتراوح حجم حبيباته بين 0.1 و6 mm، أما سرعة هواء التمييع (التخلخل) الذي يرسل في الأرضية المثقبة عبر طبقة الوقود فتتراوح بين 3 و 8m/s وبعكس فرشة الوقود الدوامية الساكنة فإن فرشة الوقود الدوامية الدوارة تملأ حجم حجرة الاحتراق كله.

وتسود في فرشة الوقود الدوامية الدوارة لرقمي أرخميدس وفرود القيم التالية:

$$0.01 < Ar < 100$$

و

$$0.01\ (\rho_p / \rho - 1) < Fr < 100\ (\rho_p / \rho - 1)$$

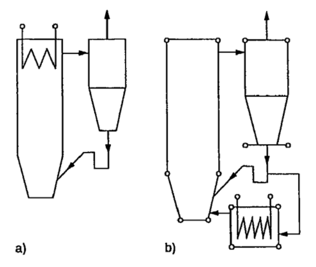
يمكن حساب سرعة النقل وفق العلاقة التجريبية التالية (من أجل $20 > Ar < 5.10^4$):

$$w_{tr} = 1.45\ (\nu / d_p)\ Ar^{0\ 484} \qquad (31.4)$$

حيث: ν اللزوجة الحركية لمادة التمييع [m²/s]

d_p القطر الوسطي للحبيبة

Ar رقم أرخميدس.



الشكل 13.4 : إعادة الحبيبات الصلبة من الفرازة (السيكلون) إلى فرشة الوقود الدوامية الدوارة عن طريق وعاء غاطس (a) أو عن طريق مبرّد ذي فرشة نقالة (b).

مثال 4.4

ما هي سرعة نقل حبيبات الفحم التي قطرها الوسطي 1 وكتلتها النوعية 1450 kg/m^3 عند درجة الحرارة 850 ^oC والضغط 1 bar.

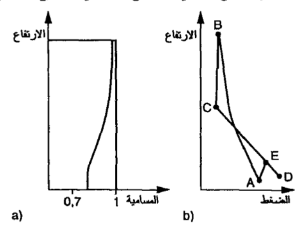
مواصفات الهواء عند درجة الحرارة 850 ^oC والضغط 1 bar هي: $\rho = 0.314\ kg/m^3$، $\nu = 142.65 \times 10^{-6}\ m^2/s$، $Ar = 2225.7$.

الحل

$$w_{tr} = 1.45\ (\nu / d_p)\ Ar^{0.484}$$
$$= 1.45\ (142.65 \times 10^{-6}\ m^2/s / 1 \times 10^{-3}\ m)\ 2225.7^{0.484}$$
$$= 8.63\ m/s$$

تُفصل حبيبات الفحم التي لم تحترق بشكل كامل مع حبيبات الرماد في فرازة تالية وتعاد إلى فرشة الوقود الدوامية عن طريق وعاء غاطس أو عن طريق مبرد ذي فرشة نقالة والشكل (13.4) يوضح ذلك بشكل تخطيطي.

يتناقص حجم الحبيبات وكثافة تواجدها في فرشة الوقود الدوامية الدوارة بالابتعاد عن الأرضية المثقبة، ولكن مسامية الفرشة تزداد من 0.7 في الأسفل إلى 1 في الأعلى الشكل (a14.4).



الشكل 14.4 : تغير المسامية (a) والضغط (b) تبعاً للارتفاع في فرشة وقود دوامية دوارة.

ضياع الضغط

من أجل دورة للوقود الصلب في حجرة الاحتراق AB (ضياع ضغطها Δp_{FR}) وفي المنطقة الانتقالية (التي ضياع ضغطها Δp_{tr})، وفي الفرازة BC (التي ضياع ضغطها Δp_c) وعند خط

الإرجاع CED (الذي ضياع ضغطه Δp_R) وكما هو موضح في الشكل (b14.4) يمكن كتابة معادلة موازنة الضغط التالية:

$$\Delta p_R = \Delta p_{FR} + \Delta p_{tr} + \Delta p_c \quad [Pa] \qquad (32.4)$$

تتحدد Δp_R وΔp_{tr} بناءً على وزن الجسم الصلب في الموقع المدروس من الدورة وبمراعاة تغير المسامية ε لفرشة الوقود ولارتفاعها H وبإهمال وزن الغاز، وذلك من العلاقة التالية:

$$\Delta p = g \int (1 - \varepsilon)\, \rho_p \, dH \quad [Pa] \qquad (33.4)$$

وضياع الضغط للفرازة:

$$\Delta p_Z = \zeta \rho\, w_{c,ent}^2 / 2 \quad [Pa] \qquad (34.4)$$

حيث: ζ عامل المقاومة للفرازة

ρ الكتلة النوعية للغاز $[kg/m^3]$

$w_{c,ent}$ سرعة الغاز عند مدخل الفرازة [m/s].

عند إقلاع (بدء تشغيل) مولد البخار تتألف الفرشة الدوامية من المادة الداخلية فقط (رمل كوارتزي أو رماد). بسبب العطالة الحرارية العالية للفرشة الدوامية فإن زمن الإقلاع عند التشغيل من الحالة الباردة أكبر من زمن إقلاع مولدات البخار التقليدية، ولكنه عند التشغيل من الحالة الساخنة يكون أصغر من المولدات التقليدية.

2.4.4 تخفيض انبعاثات الغازات الضارة في فرشة الوقود الدوامية

يمكن التمييز بين:

- الحرق في فرشة الوقود الدوامية المستقرة عند الضغط الجوي.
- الحرق في فرشة الوقود الدوامية الدوارة.
- الحرق في فرشة الوقود الدوامية ذات الضغط العالي.

ومزايا الحرق في فرشة الوقود الداومية هي:

- سحب الكبريت في حجرة الاحتراق.
- الانبعاث القليل لأكاسيد الآزوت (النتروجين) بسبب درجات الحرارة المنخفضة السائدة (850 حتى 900 °C).

يوجد في غرف الاحتراق لمولدات البخار ذات الفرشة الدوامية مزيج من المواد الصلبة يتكون من جزيئات من الفحم (الكربون) والرماد والكلس.

تتراوح درجة الحرارة في فرشة الوقود الدوامية بين 800 و900°C، ويمكن تحقيق ذلك عن طريق تركيب سطوح تسخين مثل المبخرات أو عن طريق اختيار قيمة مناسبة لعامل فائض الهواء. يمكن سحب أكاسيد الكبريت بسهولة عند استخدام فرشة الوقود السائلة. وإذا استخدم الحجر الكلسي مع الفحم فإن الكلس يتحد مع ثانـــي أوكسيد الكبريت الذي ينشأ مع غازات الاحتراق ويتشكل الجص (الجبصين، الجبس) الذي يطرح مع الرماد. وتعد النسبة Ca/S عامل تأثير هام إلى جانب درجة الحرارة. وتبلغ هذه النسبة في فرشة الوقود الدوامية الدوارة 1.5 ــ 2.5 وفي فرشة الوقود الدوامية المستقرة تكون بحدود 3 أو أعلى. يكون انبعاث SO_2 في فرشة الوقود السائلة المستقرة 100 ppm (حوالي 290 mg/m^3 عند الشروط النظامية).

يتأمن في الفرشة الدوامية الوقت الكافي لهذه التفاعلات عند درجة حرارة مثلى للتفاعل.

يتناقص تشكل NO من هواء الاحتراق بشكل كبير في فرشة الوقود الدوامية، وذلك بسبب انخفاض درجة حرارة الاحتراق، وينشأ No_x في غازات احتراق فرشة الوقود الدوامية بشكل رئيسي بسبب تأكسد الآزوت (النتروجين) الموجود في الوقود. يتم تقسيم هواء الاحتراق إلى هواء أولي وثانوي. يقوم الهواء الأولي بتمييع (خلخلة) الحبيبات الصلبة ويرسل بكميات تكفي لهذا الغرض عبر الأرضية المثقبة لفرشة الوقود الدوامية، ويقوم بالإضافة إلى ذلك بدوره في الاحتراق. أما الهواء الثانوي فيُساق إلى حجرة الاحتراق فوق فرشة الوقود الدوامية بقصد إتمام الاحتراق، ويمكن عن طريق الإحراق في مرحلتين تخفيض تركيز No_x في غـــازات الاحتراق مـــن 50 إلى 100 ppm أو 100 إلى 200 mg/m^3 (NO_2 في الشروط النظامية، عند مخرج المرجل). وتبلغ في فرشة الوقود الدوامية المستقرة 150 إلى 250 ppm أو 300 إلى 500 mg/m^3 (NO_2 في الشروط النظامية، عند مخرج المرجل).

أما مركبات HCl وHF التي مصدرها الوقود فإنها تتشكل عند درجات الحرارة التي تسود عادة في فرشة الوقود الدوامية بمعدل 50 إلى 80 % بالنسبة للكلور و90 إلى 99 % بالنسبة للفلور.

أما سرعة الغاز فتكون في فرشة الوقود الدوامية المستقرة متوسطة بين المعسبات وبين حراقات الفحم المسحوق ذات السرعة العالية للغاز في حجرة الاحتراق. وتقع درجة الحرارة في العادة عند 850 °C ومع اختلاف ±50°C.

تتراوح قيمة التحميل السطحي في فرشة الوقود السائلة المستقرة بين 1 و3 MW/m^2.

عند اكتمال احتراق الأجزاء القابلة للاحتراق في الفحم فإن حبيبات الحم الصغيرة جداً تحمل مع غازات الاحتراق وتغادر فرشة الوقود الدوامية، أما بقايا الاحتراق فإنها تسقط عبر ثقوب الأرضية ليتم سحبها. وتحمل غازات الاحتراق جسيمات الرماد بحدود 80 g / m^3.

أما طرح الحرارة من حجرة الاحتراق ذات فرشة الوقود الدوامية المستقرة فيجري بمساعدة سطوح تسخين غاطسة، وهذا مرتبط بالمشاكل التالية:

ـــ تآكل (حت) سطوح التسخين الغاطسة.

ـــ عدم اكتمال الاحتراق.

ـــ ازدياد انبعاث الغازات الضارة عند الحمولات الجزئية.

تستخدم حالياً فرشة الوقود الدوامية المستقرة لحرق أنواع الوقود ذات القيم الحرارية المنخفضة (فحم بني ذو محتوى عالٍ من الرماد والرطوبة أو لحرق النفايات).

تتألف فرشة الوقود الدوامية الدوارة من حجرة احتراق وفرازة ومجرى لإرجاع الحبيبات الصلبة، وتحمل هذه الحبيبات عادة مع تيار الغاز فتغادر فرشة الوقود الدوامية وتصل إلى الفرازة التي تفصلها عن غازات الاحتراق، ويُعاد الرماد مع الفحم إلى حجرة الاحتراق.

ومن أنواع فرشات الوقود الدوامية التي يتم إنتاجها هناك Ahlström، Circofluid، Ecoflow، وLurgi.

ولتمييزها عن بعضها فهناك الحراقات التالية:

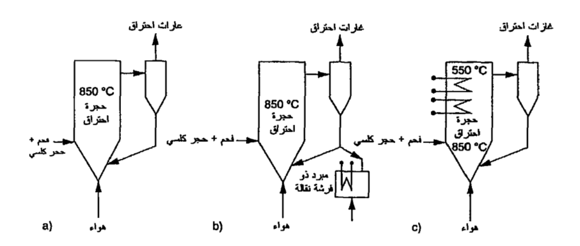
ـــ حراقات فرشة الوقود الدوامية الدوارة مع وعاء غاطس وإحكام هيدروليكي،

ـــ حراقات فرشة الوقود الدوامية الدوارة مع مبرد ذي فرشة نقالة،

ـــ حراقات Circofluid (ذات المائع الدوار).

والشكل (15.4) يبين أنواع مولدات البخار بشكل تخطيطي.

وفي الحراقات من النوع الأول يحدث انتقال الحرارة بشكل رئيسي عند جدار حجرة الاحتراق التي تُصنع من أنابيب ملحومة أي كجدار غشائي (membrane). يمكن في الجزء العلوي من حجرة الاحتراق إضافة سطوح تسخين، وهي عبارة عن أنابيب موضوعة بشكل أفقي إلى جانب بعضها البعض وتعبرها بشكل متعامد غازات الاحتراق. يتراوح التحميل الحراري السطحي لحجرة احتراق فرشة الوقود الدوامية الدوارة بين 3 – 8 MW/m^2.

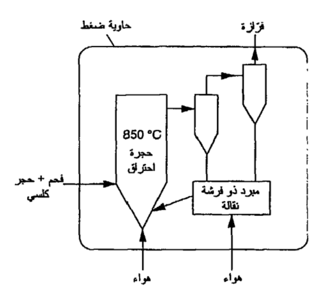


الشكل 15.4 : مولدات البخار ذات فرشة الوقود الدوامية الدوارة (a) فرشة عادية (b) فرشة مع مبرد ذي فرشة نقالة (c) مائع دوّار.

وحتى عام 1994 بنيت في العالم 146 منشأة من النوع الأول ومجموع استطاعتها الحرارية P_{th} حوالي 15 GW، أنتجت شركة Ahlström Pyropower السويدية 92 منها باستطاعة حرارية P_{th} قدرها 9.9 GW وأنتجت شركة KDO Tampella الفنلاندية 18 منشأة باستطاعة حرارية P_{th} قدرها 2.6 GW وشركة Lurgi الألمانية أنتجت 9 منشآت باستطاعة حرارية P_{th} تبلغ 0.9 GW... إلخ. وفي اليابان تعمل منذ عام 1994 أكبر منشاة في العالم Takehara ذات فرشة وقود دوامية مستقرة باستطاعة كهربائية 350 MW، وفي عام 1995 وضعت في الخدمة أول منشاة لفرشة وقود دوامية دوارة باستطاعة كهربائية 250 MW، وسيتم التحول إلى وحدات كبيرة لفرشة الوقود الدوامية الدوارة وباستطاعات 500 إلى 600 MW. توجد في العالم حتى الآن أربع منشآت تعمل بفرشة وقود دوامية مضغوطة، وتجرب الآن في اليابان منشأة من هذا النوع باستطاعة كهربائية قدرها 71 MW (في واكاماتسو Wakamatsu).

لتسهيل امتصاص الحرارة المفيدة من فرشة الوقود الدوامية الدوارة يستخدم مبّرد ذو فرشة نقالة، يركب تحت الفرازة. ويسحب من هذا المبرد حوالي 40 % من استطاعة التبخير الإجمالية، وقد رُكب حتى الآن 43 فرشة وقود دوامية دوارة مع مبرد ذي فرشة نقالة ويـــبلغ مجموع استطاعتها 7.7 GW. شركة Lurgi بنت 3 منشآت P_{th} = 800 MW وشركة Steinmüller بنت منشأتين P_{th} = 250 MW. أما شركة Babcock فقد طورت وبنت 21 منشاة من النوع Circofluid وباستطاعة حرارية إجمالية قدرها 1.8 GW.

يتحسن احتراق الفحم ويصبح من الأسهل امتصاص أوكسيد الكبريت عن طريق الحجر الكلسي، وكذلك يقل نشوء أكاسيد الآزوت في حجرة الاحتراق وذلك كلما ارتفع الضغط في حجرة الاحتراق. فبذلك يمكن تصغير حجم حجرة الاحتراق وربما مساحة سطوح التسخين. ولإيصال الفحم إلى فرشة الوقود الدوامية المضغوطة وللتخلص من الخبث تستخدم بحارٍ خاصة معقدة. الشكل (16.4) يوضح تخطيطياً حراقات فرشة الوقود الدوامية الدوارة.



الشكل 16.4 : مخطط عمل فرشة الوقود السائلة الدوارة ذات الضغط العالي والمبرّد ذي الفرشة النقالة.

على العكس من فرشة الوقود الدوامية التي تعمل عند الضغط الجوي فإن فرشة الوقود الدوامية المضغوطة يمكنها أن تعمل في منشآت الدارة المركبة (العنفات الغازية والبخارية) تتضمن المنشأة عندئذٍ فرشة وقود دوامية مضغوطة، وساحب الغبار من الغاز الساخن وعنفة غازية ومرجل امتصاص حرارة الغازات ومنشأة عنفة بخارية، وحجرة احتراق فرشة الوقود الدوامية تعوض في هذه الحالة عن حجرة احتراق العنفة الغازية. يجري الغاز الذي يفوق ضغطه 10 bar ودرجة حرارته 900 °C حول ساحب الغبار من الغاز الساخن ثم يدخل على العنفة الغازية،وبعد تمدده في العنفة الغازية يستخدم الغاز لتوليد البخار في المرجل الموصول بمنشأة البخار التالية. ولتحقيق مردودٍ عالٍ يجب أن تكون درجة حرارة دخول الغاز إلى العنفة الغازية 1100 °C، بينما تقع درجة الحرارة المثلى لارتباط الكبريت في فرشة الوقود الدوامية في حدود 800 إلى 900 °C. ستتم معالجة منشآت الدارة المركبة في الفصل الثامن.

5.4 تصميم سطوح التسخين

1.5.4 الموازنة الحرارية لسطوح التسخين والاستطاعة الحرارية المنتقلة

سنعرض في هذا الفصل التصميم الحراري لسطوح التسخين. إن تصميم مولد البخار شديد التعقيد، إذ أن ذلك يتضمن قبل كل شيء الحساب الحراري وحساب الجريانات لسطوح التسخين، والجزء التالي للتصميم هو حساب المقاومة للأجزاء المعرضة للضغط ولمساند الحمل وكذلك تحديد أجهزة القياس والتحكم. من أجل حسابات الجريان يمكن الاستعانة بالمبادئ التي عرضناها في الفصل الأول.

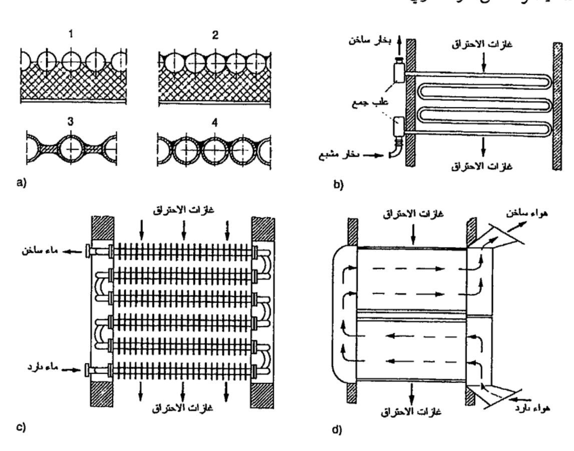
توضع الأسس اللازمة لهذه الحسابات استناداً إلى معطيات عن الاستطاعة ومواصفات البخار وماء التغذية (ضغط ودرجة حرارة ماء التغذية والبخار الطازج وكذلك شروط التحميص الوسطي)، وعن مواصفات الوقود وطريقة إحراقه إلخ.. وتوضع لكل جزء الموازنة الحرارية والكتلية.

تتألف سطوح تسخين مولد البخار من قسم تنتقل الحرارة إليه بالحمل وآخر بالإشعاع. الأجزاء التي تنتقل إليها الحرارة بالإشعاع هي المبخرات والمحمصات الإشعاعية. يوضع المبخر على جدران حجرة الاحتراق، أما المحمص الإشعاعي فيعلق على الجزء العلوي لغرفة الاحتراق. أما الأجزاء التي تنتقل الحرارة إليها بالحمل فهي المحمصات التلامسية والمحمصات الوسطية والمسخنات الأولية للماء (Eco) ومسخنات الهواء. وتوضع عادة في المجرى الثاني للمرجل (الغلاية).

يقوم الحساب الحراري لمولد بخار على حسابات عمليات انتقال الحرارة (انظر الفصل الأول). ويُراعى في حجرة الاحتراق بالدرجة الأولى إشعاع الغاز والشعلة، ويمكن عملياً إهمال انتقال الحرارة بالحمل. يُشارك في سطوح الإشعاع إلى جانب الإشعاع الحمل أيضاً. يُراعى في سطوح الحمل عملية الحمل بالدرجة الأولى إلى جانب إشعاع غازات الاحتراق. إذا كانت درجة حرارة غازات الاحتراق أدنى من 400 °C، فإن إشعاع الغازات يمكن إهماله.

فيما يلي سنعرض الأسس اللازمة للدراسة الحرارية لسطوح تسخين مولد البخار،وهدف هذه الحسابات هو تحديد مساحة سطوح التسخين اللازمة، وسنقدم كمثال دراسة عن مسخن أولي لماء التغذية (Eco) ومسخن هواء أولي متجدد.

يوضح الشكل (17.4) بشكل تخطيطي تفاصيل كل من المبخر والمحمص والمسخن الأولي لماء التغذية، ومسخن الهواء الأولي.



الشكل 17.4 : التصميم النمطية لسطوح التسخين (a) مبخر 1) جدار حجرة احتراق غشائي membrane 2) جدار ذو طبقة واحدة من الأنابيب 3) صفائح ملحومة 4) أنابيب ملحومة، (b) محمص، (c) مسخن ماء أولي، (d) مسخن هواء أولي أنبوبـــي.

الموازنة الحرارية لسطح التسخين

تكتب معادلة الموازنة الحرارية لسطح تسخين ما بالشكل التالي:

$$Q = m_G\,(h_{G,ent} - h_{G,exit}) = m_f\,(h_{f,exit} - h_{f,ent}) \quad [W] \tag{35.4}$$

حيث: Q التدفق الحراري (أي الاستطاعة الحرارية المتبادلة) [W]

m_G التدفق الكتلي لغازات الاحتراق [kg/s]

$h_{G,ent}$ و$h_{G,exit}$ الانتالبي النوعي لغازات الاحتراق عند الدخول والخروج [J/kg]

m_f تدفق المائع الكتلي (الماء، البخار، الهواء) [kg/s]

$h_{f,ent}$، $h_{f,exit}$ الانتالبي النوعي للمائع عند الدخول والخروج من سطح التسخين [J/kg].

يمكن التعويض عن انتالبي غازات الاحتراق وانتالبي المائع (ماء، بخار، هواء) بجداء درجة الحرارة t [°C] والسعة الحرارية النوعية c_p [J/kg K]، لكن المبخر يشكل استثناءً لأنه يحدث فيه تغير في الطور (الحالة) أي من الماء إلى البخار مع بقاء درجة حرارة الإشباع ثابتة.

الاستطاعة الحرارية المنتقلة

تتألف عملية نفوذ الحرارة من غازات الاحتراق إلى المائع الوسيط الذي يوجد في داخل سطوح التسخين من انتقال للحرارة من غازات الاحتراق إلى السطح الخارجي للسطوح ومن التوصيل في الجدار وبعدها انتقال الحرارة من الجدار الداخلي لسطح التسخين إلى الوسيط الذي يجري داخل سطح التسخين. تُحسب الاستطاعة الحرارية المنتقلة وفق ما يلي:

1. من اجل عملية انتقال الحرارة من غازات الاحتراق إلى سطح التسخين

$$Q = \alpha_{out} A_{out} (t_G - t_{w,out}) \quad [W] \tag{36.4}$$

2. وللتوصيل الحرارية في الجدار:

$$Q = (\lambda / \delta) A_m (t_{w,out} - t_{wi}) \quad [W] \tag{37.4}$$

3. ولانتقال الحرارة من سطح التسخين إلى المائع الذي يجري في الداخل:

$$Q = \alpha_i \; A_{in} (t_{wi} - t_f) \quad [W] \tag{38.4}$$

حيث: α_{out}، α_i عامل انـــتقال الحرارة عند السطح الخارجي أو الداخلي لسطح التسخين [W/m² K]

A_{out}، A_m، A_{in} السطح الخارجي، الوسطي، الداخلي على التسلسل [m²]

λ عامل التوصيل الحراري لمادة سطح التسخين [W/m K]

δ سماكة الجدار [m]

t_G، t_f درجة حرارة غازات الاحتراق أو المائع داخل سطح التسخين [°C]

$t_{w,out}$، t_{wi} درجة حرارة السطح الخارجي أو الداخلي [°C].

يمكن حساب درجات حرارة السطح الخارجية والداخلية ودرجة الحرارة الوسطية للجدار كما يلي:

$$t_{wi} = t_f + Q / A\ \alpha_i \quad ، T_{w,out} = t_G - Q / A\ \alpha_{out}$$

و
$$t_w = (t_{w,out} + t_{wi}) / 2 \qquad (39.4)$$

2.5.4 إشعاع الغاز والشعلة في حجرة الاحتراق

لتصميم مولد البخار فإن التبادل الحراري بالإشعاع ذو أهمية كبيرة، ونميز هنا بين إشعاع الغاز وإشعاع الشعلة. يحسب التيار الحراري المنتقل بالإشعاع من غازات الاحتراق إلى الجدار المحيط أو الجدار الغشائي للمبخر في حجرة الاحتراق كما يلي:

$$Q_{rad} = A_w\ C_o\ \varepsilon_w\ [\varepsilon_G\ (T_G / 100)^4 - \alpha_G\ (T_w / 100)^4] \qquad (40.4)$$

حيث: A_w سطح التسخين أو الجدار [m^2]

C_o 5.67 $W/m^2\ K^4$ عامل الإشعاع الحراري للجسم الأسود

T_G، T_w درجة حرارة الغاز الوسطية أو درجة حرارة الجدار الوسطية [K]

ε_w عامل إصدار سطح التسخين

ε_G عامل إصدار غازات الاحتراق عند درجة الحرارة T_G (emission)

α_G عامل امتصاص غازات الاحتراق عند درجة حرارة الجدار T_w.

يحسب عامل امتصاص غازات الاحتراق α_G عند درجة الحرارة t_w.

تستخدم المعادلة (40.4) أيضاً من أجل سطوح التسخين الأخرى في مولد البخار.

ولحساب ε_w يمكن اعتماد القيم التالية 0.7 – 0.96 للمعادن المؤكسدة، 0.7 – 0.93 لمواد البناء، 0.76 – 0.89 لرواسب الخبث على سطوح التسخين.

من بين مركبات غازات الاحتراق يشارك فقط CO_2. وبخار الماء H_2O في الإشعاع الغازي.

وتتعلق درجة الإصدار بدرجة الحرارة، وتتألف من الإصدار الحراري لكلٍّ من CO_2 وH_2O:

$$\varepsilon_G = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} \qquad (41.4)$$

ولحساب درجة إصدار CO_2 وH_2O يمكننا أن نكتب:

$$\varepsilon_{CO_2} = 1\ \exp\,(-s\ k_{CO_2}\ p_{CO_2})$$

و
$$\varepsilon_{H_2O} = 1\ \exp\,(-s\ k_{H_2O}\ p_{H_2O}) \qquad (42.4)$$

حيث: s المسافة الوسطية (سماكة طبقة الغاز) في الحيز المملوء بغازات الاحتراق [m]

k_{CO_2} أو k_{H_2O} عامل الإخماد (الانطفاء) لـ CO_2 وH_2O [$^1/_m$ Pa]

p_{CO_2} أو p_{H_2O} الضغط الجزئي لـ CO_2 وH_2O [Pa].

يحسب الضغطان الجزئيان لـ CO_2 وH_2O بالاستعانة بالحجوم الجزئية r_{CO_2} وr_{H_2O} والضغط الكلي p كما يلي:

$$p_{H_2O} = p\, r_{H_2O} \ \ [Pa] \quad و \quad p_{CO_2} = p\, r_{CO_2} \ \ [Pa] \tag{43.4}$$

أما مسار الإشعاع أي سماكة الطبقة الغازية (مثلاً حجرة الاحتراق) s فتحسب كما يلي:

$$s = 3.6\ V / A_u \ \ [m] \tag{44.4}$$

حيث: V حجم الحجرة المملوءة بالغاز (مثلاً حجرة الاحتراق) [m^3]

A_u مساحة السطح الجانبي للحيز [m^2].

بمراقبة إشعاع اللهب يمكن التمييز بين شعلة مضيئة وشعلة غير مضيئة. يحترق الغاز الطبيعي بشعلة غير مضيئة، بينما يحترق الوقود السائل والفحم بشعلة مضيئة. وسبب إضاءة الشعلة هو بشكل أساسي حبيبات الهباب التي تتشكل باحتراق الفحوم الهيدروجينية الثقيلة للوقود السائل والأجزاء الطيارة من الفحم. ويبلغ قطرها الوسطي حوالي 0.03 mm. وتنشأ عند إحراق مسحوق الفحم حبيبات معلقة (معلقات) من الكربون وفحم الكوك والرماد في الغازات ضمن حجرة الاحتراق، وهذه حجمها أكبر بكثير من حبيبات الهباب.

إن درجة الإصدار (emission) للشعلة المضيئة أعلى بكثير منها للشعلة غير المضيئة. وتتميز الشعلة المضيئة بالإشعاع المستمر للحبيبات،وهو يتعلق بالعوامل التالية: تحميل غازات الاحتراق بالحبيبات، وحجمها وكثافتها، ودرجة الحرارة والمسار الوسطي للإشعاع. تساهم الحبيبات بشكل خاص في مجال الأشعة تحت الحمراء بإصدار اللهب.

تُعطى المعادلة التقريبية التالية لحساب درجة إصدار الهباب:

$$\varepsilon_{soot} = 1 - \exp\,(-\, s\, k_R\, c_R) \tag{45.4}$$

حيث: k_R عامل الامتصاص لحبيبات الهباب [m^2/kg]

c_{soot} تحميل غازات الاحتراق بالهباب [kg/m^3].

تتراوح قيمة عامل الامتصاص k_{soot} لإشعاع الهباب بين 960 و3400 m^2/kg. وكقيمة استرشادية لتركيز الهباب c_{soot} في شعلة الوقود السائل المضيئة تؤخذ 750 mg/m^3 وفي شعلة الوقود الغازي غير المضيئة تؤخذ 2.5 mg/m^3.

تنتج درجة الإصدار (emission) ε_{Fl} لشعلة مسحوق الفحم من العلاقة التالية:

$$\varepsilon_{Fl} = 1 - (1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_c)(1 - \varepsilon_{ck})(1 - \varepsilon_A) \quad (46.4)$$

حيث: ε_G، ε_c، ε_{ck}، ε_A درجات الإصدار لغازات الاحتراق والكربون وفحم الكوك والرماد على التسلسل.

تحسب درجة الإصدار للكربون وفحم الكوك، وحبيبات الرماد بشكل مشابه لحبيبات الهباب كما هو وارد في المعادلة (45.4).

وبطريقة تقريبية يُحسب تيار الإشعاع من الشعلة إلى الجدار أو إلى سطح تسخين المبخر كما يلي:

$$Q_{Rad} = A_{fl}\, C_o\, \varepsilon_{eff}\,[(T_{Fl} / 100)^4 - (T_w / 100)^4] \quad [W] \quad (47.4)$$

حيث: A_{Fl} السطح المحيط بالشعلة [m^2]

ε_{eff} درجة لإصدار الفعلية لحجرة الإحتراق

T_{Fl} و T_w درجة الحرارة الوسطية للشعلة والجدار.

تنتج قيمة ε_{eff} من درجات الإصدار (ε_{Fl}، ε_w) والسطوح (A_{Fl}، A_w) للشعلة و جدار حجرة الاحتراق:

$$\varepsilon_{FR} = 1 / [1 / \varepsilon_{Fl} + (1 / \varepsilon_w - 1)\, A_{Fl} / A_w] \quad (48.4)$$

يمكن حساب درجة الحرارة T_G فقط بطريقة التكرار (iterative) من الموازنة الحرارية لحجرة الاحتراق، أما درجة الحرارة الوسطية فيمكن حسابها وفق العلاقة التقريبية التالية:

$$T_{Fl} = \sqrt{T_{th}\, T_{FR}} \quad [K] \quad (49.4)$$

حيث: T_{th} وT_{FR} درجة حرارة الاحتراق النظرية لغازات الاحتراق ودرجة حرارة غازات الاحتراق في نهاية حجرة الاحتراق. يبين الجدول (11.2) قيماً استرشادية لكل من t_{th} و t_{FR}.

2.5.4 انتقال الحرارة على سطوح التسخين الخارجية والداخلية

انتقال الحرارة الخارجي (من جهة غازات الاحتراق)

يحدث انتقال الحرارة من الغازات إلى سطوح التسخين الإشعاعية أو التلامسية لمولد البخار عن طريق الإشعاع والحمل، ويتألف التيار الحراري من الغازات إلى سطح التسخين (مبخر، محمص، محمص وسطي، موفّر، مسخن أولي للهواء) من جزء حملي وآخر إشعاعي: تطبق العلاقة التالية لحساب التيار الحراري الإجمالي من الغازات إلى سطح التسخين:

$$Q = Q_c + Q_{Rad} = (\alpha_c + \alpha_{Rad})\, A\, (t_G - t_w) \quad [W] \tag{50.4}$$

حيث: α_c، α_{Rad} عامل انتقال الحرارة بالحمل والإشعاع وذلك من الغازات إلى سطح التسخين [W/m² K]

A سطح التسخين [m²]

t_G، t_w درجة حرارة الغازات والجدار [°C].

من أجل الأنابيب وحزم الأنابيب التي يعبرها الجريان بشكل عرضي يُحسب عامل انتقال الحرارة بالحمل α_c من جهة غازات الاحتراق كما يلي:

$$Nu = 1.11\, C\, R_e^n\, Pr^{0.31} \tag{51.4}$$

ومجال الصلاحية هو: $Pr = 0.5 - 1000$.

يتعلق المقدار الثابت c والأس n عند الجريان حول حزمة حول أنابيب وعند رقم رينولدز الواقع في المجال بين 5×10^3 و7×10^4 بالمقادير التالية: توضّع الأنابيب (خلف بعضها كما في الشطرنج أو منـــزاحة وغير مرتبة خلف بعضها)، التقسيم النسبي العرضي والطولي للأنابيب (t_q/d ،t_l/d) الذي تتراوح قيمته بين 0.6 و3. لذلك يجب تحديد مواصفات غازات الاحتراق عند درجة الحرارة الوسطية.

لحساب عامل انتقال الحرارة بالإشعاع.

$$\alpha_{Rad} = Q_{Rad} / A\, (t_G - t_w) \tag{52.4}$$

حيث: تحسب Q_{Rad} بحسب العلاقة (40.4).

انتقال الحرارة الداخلي (من جهة الوسيط المتلقي للحرارة)

يحسب عامل انتقال الحرارة بالحمل α من السطح الداخلي للأنابيب إلى المائع الذي يجري في داخلها (أي الماء أو البخار أو الهواء) والتي تشكل سطوح تسخين مولد البخار وفق القوانين التي سنعرضها فيما يلي. من أجل الجريان الداخلي المضطرب (غير المنتظم) للمائع المألوف تستخدم العلاقة بين رقم نوسِل من جهة ورقم رينولدز ورقم برانتل من جهة أخرى (قارن الفصل الأول).

يُحسب عامل انتقال الحرارة من أجل رقم نوسِل معطى كما يلي:

$$\alpha = \lambda\, Nu / d \quad [W/m^2K] \tag{53.4}$$

حيث: λ عامل توصيل (ناقلية) المائع [W/m K]

d الطول المميز (القطر للأنابيب التي يجري المائع حولها أو على طولها [m].

يحسب عامل انتقال الحرارة لمختلف سطوح التسخين (مبخر، محمص، محمص وسطي، موفر، مسخن أولي للهواء) إما مباشرة أو بمساعدة معادلة رقم نوسِل.

ومن أجل المحمص أو المحمص الوسطي فإن عامل انتقال الحرارة من جهة البخار يحسب بمساعدة رقم نوسِل من المعادلة التالية:

$$Nu = 0.024\, Re^{0.786}\, Pr^{0.45}\, [1 + (d / L)^{2/3}] \qquad (54.4)$$

حيث: $Re = w\, d / \nu$ رقم رينولدز

Pr رقم برانتل

w سرعة جريان البخار [m/s]

d القطر الداخلي للأنبوب [m]

L طول الأنبوب [m]

ν اللزوجة الحركية للبخار [m^2/s].

تعطى القيم المميزة للبخار (عامل التوصيل الحراري λ واللزوجة الحركية ν) ورقم برانتل المرتبط به عند درجة الحرارة المرجعية التالية:

$$t_m = 0.5\, [t_w + 0.5\, (t_{v,ent} + t_{v,exit})] \quad [°C]$$

حيث: t_w درجة حرارة جدار الأنبوب [°C]

$t_{v,ent}$ و$t_{v,exit}$ درجة حرارة دخول البخار وخروجه [°C].

من أجل الجريان المضطرب للماء في الموفر (*Eco*) أي مسخن الماء الأولي وعندما يكون $Re > 2320$ و $Pr = 1.5 - 500$ يُحسب رقم نوسل بالعلاقة التالية:

$$Nu = 0.012\, (Re^{0.87} - 280)\, Pr^{0.4}\, [1 + (d / L)^{-2/3}]\, (Pr / Pr_w)^{0.11} \qquad (55.4)$$

حيث: Pr وPr_w رقم برانتل للماء عند درجة حرارة وسطية t_f وعند درجة حرارة جدار الأنبوب t_w.

مـــن أجل مسخن الهواء الأولـــي المتجدد وعند جريان مضطرب للهواء (عند $Re > 2320$ و $Pr = 0.5 \rightarrow 1.5$) تستخدم المعادلة التالية:

$$Nu = 0.0214\, (Re^{0.8} - 100)\, Pr^{0.4}\, [1 + d / L)^{2/3}]\, (t_m / t_w)^{0.45} \qquad (56.4)$$

حيث: t_{m} و t_{w} درجة الحرارة الوسطية للهواء أو للجدار [°C].

تؤخذ القيم المميزة للمانع سواءً كان الماء أو الهواء (أي عامل التوصيل الحراري λ واللزوجة الحركية ν) ورقم برانتل الموافق من الجداول A.13 وA.14 في الملحق عند درجة حرارة وسطية للمائع.

4.5.4 انتقال الحرارة من فرشة الوقود الدوامية إلى سطوح التسخين

في فرشة الوقود السائل المستقرة التي تعمل عند الضغط الجوي تغطس سطوح التسخين في الفرشة – أما في فرشة الوقود السائلة الدوارة وتجنباً للتآكل بسبب السرعة العالية للغاز وبشكل خاص سرعات الحبيبات الصلبة، فإنه يستغنـــى في هذه الحالة عن سطوح التسخين الغاطسة في الفرشة. تصنع عادة سطوح التسخين للمبخر في حجرة الوقود السائلة الدوارة كجدران غشائية أو كجدار أنابيب مزعنفة.

يُراعى في عامل انتقال الحرارة α_{FB} من فرشة الوقود الدوامية إلى سطوح التسخين انتقال الحرارة بالحمل والإشعاع. من أجل فرشة الوقود الدوامية المستقرة التي تعمل عند الضغط الجوي، ولحساب عامل انتقال الحرارة من الفرشة إلى الأنابيب الغاطسة يمكن استخدام العلاقة التجريبية التالية:

$$\alpha_{\mathrm{FB}} = 900\,(1-\varepsilon)\,(\lambda / d_{\mathrm{a}})\,[(w\,d_{\mathrm{a}}\rho_{\mathrm{p}} / 2\mu)\,(\mu^2 / g\,d_{\mathrm{p}}^3\rho_{\mathrm{p}}^2)]^{0.326}\,Pr^{0.3} + \varepsilon_{\mathrm{ff}}\,\sigma\,(T_{\mathrm{ws}}^4 - T_{\mathrm{w}}^4)/(T_{\mathrm{ws}} - T_{\mathrm{w}}) \quad [\mathrm{W/m^2K}] \tag{57.4}$$

حيث: ε مسامية فرشة الوقود السائلة

λ عامل التوصيل (الناقلية) الحراري للغاز [W / mK]

w سرعة جريان الغاز عند المقطع الفارغ للجهاز [m/s]

d_{a} القطر الخارجي للأنبوب [m]

ρ_{p} الكتلة النوعية للجسيم (الحبيبة) [kg / m³]

μ اللزوجة الديناميكية للغاز [Pa . s]

g التسارع الأرضي [m² /s]

d_{p} قطر الحبيبة [m]

Pr رقم برانتل للغاز

$\varepsilon_{\mathrm{ff}}$ درجة الإصدار الفعلية للجملة المؤلفة من فرشة العقود السائلة وسطح التسخين

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ W / m^2K^4$

T_{FB} وT_W درجة حرارة فرشة الوقود السائلة وسطح التسخين (جدار الأنبوب) [K].

تصلح هذه المعادلة عندما يكون $(w\, d_p\, \rho / \mu) > 10$:

ولحساب درجة الإصدار الفعلية لجملة [فرشة الوقود السائلة وسطح التسخين] تطبق العلاقة التالية:

$$\varepsilon_{eff} = 1 / (1 / \varepsilon_{FB} + 1 / \varepsilon_w - 1) \qquad (58.4)$$

حيث: ε_{FB} وε_W درجة الإصدار لفرشة الوقود الدوامية وجدار الأنبوب.

ولحساب ε_{WS}:

$$\varepsilon_{FB} = (\varepsilon_p + 1) / 2 \qquad (59.4)$$

حيث: ε_p درجة إصدار الحبيبة (0.8 إلى 0.9)

يحدث انتقال الحرارة من فرشة الوقود الدوامية الدّوارة إلى سطوح التسخين عن طريق الحمل والإشعاع، ويساهم في انتقال الحرارة الحبيبات المضطربة المتجمعة ككتل (قطاعات) والمواقع الفقيرة بالحبيبات الصلبة من فرشة الوقود. عند كلّ لحظة يلامس جزء من سطح التسخين (α) قطاعاً من فرشة الوقود فقيراً بالحبيبات الصلبة، والجزء الآخر يلامس القطاع الغني بكتل الحبيبات المتجمعة، وبالتالي يمكن تحديد عامل انتقال الحرارة من فرشة الوقود الدوامية إلى سطح التسخين كما يلي:

$$\alpha_{FB} = \alpha\, (\alpha_c + \alpha_{Rad})_f + (1 - \alpha)\, (\alpha_c + \alpha_{Rad})_{pa} \quad [W/m^2K] \qquad (60.4)$$

حيث: α وα_{Rad} عامل انتقال الحرارة عن طريق الحمل والإشعاع.

الدليل f يُشير إلى القطاعات الفقيرة بالوقود من فرشة الوقود وp_a إلى الحبيبات المتجمعة على شكل كتلة.

ومن أجل التوصيل من الحبيبات المتجمعة إلى سطح التسخين نطبق العلاقة:

$$\alpha_{cpa} = 1 / (d_p / 10\, \lambda + \sqrt{\pi\, t_{pa} / 4\lambda_{pa} c_{pa} \rho_{pa}}\,) \qquad (61.4)$$

حيث: d_p قطر الحبيبات [m]

λ عامل التوصيل الحراري للغاز [W/mK]

t_{pa} فترة بقاء الكتلة المتجمعة من الحبيبات الصلبة على سطح التسخين [s]

λ_{pa} عامل التوصيل الحراري الفعلي لكتلة الحبيبات المتجمعة [W/mK]

c_{pa} السعة الحرارية النوعية الفعلية لكتلة الحبيبات المتجمعة [J/kgK]

ρ_{pa} الكتلة النوعية الفعلية لكتلة الحبيبات المتجمعة [kg/m^3].

ومن أجل c_{pa} و ρ_{pa} يصلح:

$$c_{pa} = (1 - \varepsilon_{pa})\, c_p + \varepsilon_{pa}\, c_g$$

أو

$$\rho_{pa} = (1 - \varepsilon_{pa})\, \rho_p + \varepsilon_{pa}\, \rho_g \qquad (62.4)$$

حيث: ε_{pa} مسامية كتلة الحبيبات المتجمعة

c_p c_g أو السعة الحرارية النوعية للحبيبات أو الغاز [$J / kg\, K$]

ρ_p ρ_g أو الكتلة النوعية لحبيبات أو الغاز [kg / m^3].

يمكن إهمال الحد الثاني في المعادلة 61.4 من أجل الحبيبات الخشنة ذات البقاء القصير على سطوح التسخين وتصبح المعادلة كما يلي:

$$\alpha_{cpa} = 10\, \lambda\, d_p \qquad (63.4)$$

ومن أجل الجزء المرتبط بالحمل في عامل انتقال الحرارة من القطاع الفقير بالحبيبات الصلبة في فرشة الوقود الدوامية إلى سطح التسخين تطبق المعادلة اللابعدية التالية:

$$Nu = (c_p / c_g)\, (\rho_d / \rho_p)^{0.3}\, Fr^{0.42}\, Pr) \qquad (64.4)$$

حيث: رقم نوسل $Nu\ \ \alpha_k\, d_p/\lambda$

α_c عامل انتقال الحرارة بالحمل من فرشة الوقود الدوامية إلى سطح التسخين [W/m^2K]

d_p قطر الحبيبات [m]

λ عامل التوصيل الحراري للغاز [W/mK]

c_p c_g أو السعة الحرارية النوعية للحبيبات الصلبة أو الغاز [J/kg K]

ρ_d ρ_p أوالكتلة النوعية للحبيبات الصلبة في القطاع الفقير بالحبيبات من الفرشة أو للحبيبات [kg/m^3]

Fr رقم فرود (Froude) اللابعدي، يحسب عند سرعة الجر للحبيبات w_a كما يلي:

$$Fr = w_a / \sqrt{(g\, d_p)}$$

Pr رقم برانتل للغاز $Pr = \nu\, \rho_g\, c_g / \lambda$

ν اللزوجة الحركية للغاز [m^2/s].

ومن أجل انتقال الحرارة بالحمل فقط تطبق المعادلة التالية:

(65.4)	$Nu = 0.009\ Pr^{1/3} Ar^{1/2} \quad [W / m^2 K]$

حيث: رقم أرخميدس = $Ar = g\, d_p^3 (\rho_p - \rho_g) / \rho_g \nu^2$

تعوض مواصفات الغاز (λ، ν، ρ، c_g) ورقم برانتل Pr في المعادلة 65.4 عند درجة حرارة فرشة الوقود الدوامية.

تقع قيم α_{cpa} بحسب المعادلة 61.4 عند الحدود العليا وبحسب المعادلة 64.4 أو 65.4 عند الحدود الدنيا للمجال الممكن. ويلعب الإشعاع في فرشة الوقود الدوامية عند درجات الحرارة 800 إلى 900 °C دوراً مهماً. وبالتبسيط ينتج عامل انتقال الحرارة بالإشعاع كما يلي:

$$\alpha_{Rad} = 4\, \varepsilon_{eff}\, \sigma\, T_m^3 \qquad (66.4)$$

حيث: α_{Rad} عامل انتقال الحرارة بالإشعاع

ε_{eff} درجة الإصدار الفعلية (عملياً لا تؤخذ إلا 0.9)

σ ثابت بولتزمان وقيمته $5.67 \,.\, 10^{-8}\ W/m^2 K^4$

T_m درجة الحرارة الوسطية للجملة المؤلفة من فرشة الوقود الدوامية T_{FB} وسطح التسخين (T_w) وتحسب كما يلي: $T_m = (T_{FB} + T_w) / 2$.

وبناءً على الخبرات المكتسبة فإنه يمكن رفع α_c المحسوبة بالعلاقة 64.4 بمقدار 30 % لمراعاة تجمع الحبيبات الصلبة في كتل.

تحدد سطوح التسخين المركبة بعد الفرازة (Cyclon) لفرشة الوقود الدوامية الدّوارة بشكل مشابه لسطوح مولدات البخار الأخرى.

إن انتقال الحرارة في فرشة الوقود الدوامية المضغوطة لم يُبحث إلا بشكل قليل، ولذلك لا توجد في الوقت الحاضر طرق حساب موثوقة لعامل انتقال الحرارة، وتستخدم المعادلات الواردة أعلاه لحساب عامل انتقال الحرارة لفرشة الوقود الدوامية المضغوطة مع بعض التحفظ.

5.5.4 تحديد السطوح الحرارية اللازمة

عامل نفوذ الحرارة

عامل نفوذ الحرارة k هو مقلوب المقاومة الحرارية ويحسب للجدران المستوية وللأنابيب الرقيقة الجدران كما يلي:

$$k = \frac{1}{1/\alpha_{out} + (\delta/\lambda)_{dirt,o} + (\delta/\lambda)_{w} + (\delta/\lambda)_{dirt,i} + l/\alpha_{i}} \quad [W/m^2K] \qquad (67.4)$$

حيث: $1/\alpha_{out}$ أو $1/\alpha_i$ المقاومة الحرارية لانتقال الحرارة على الجانب الخارجي لغازات الاحتراق أو الجانب الداخلي للمائع (الماء أو البخار أو الهواء) $[m^2K/W]$

$(\delta/\lambda)_w$ أو $(\delta/\lambda)_{dirt,o}$ أو $(\delta/\lambda)_{dirt,i}$ المقاومة الحرارة للجدران وللطبقة المتشكلة (الأوساخ) على السطح الخارجي المواجه لغازات الاحتراق، وعلى الجانب الداخلي للمائع $[m^2 K/W]$

α عامل انتقال الحرارة $[W/m^2 K]$

λ عامل التوصيل الحراري $[W/m K]$

δ السماكة $[m]$.

يمكن إهمال $1/\alpha_i$ إذا كانت α_i أكبر بكثير من α_{out} ،ولكن يجب مراعاة المقاومة (δ/λ) للسطح الخارجي وللترسبات الداخلية (الهباب، الرماد الطيار أو طبقة الأملاح المتجمعة على جدران الأنابيب).

يمكن أن ينسب عامل نفوذ الحرارة لسطوح التسخين التي تأخذ شكل حزمة من الأنابيب على السطح الداخلي أو الخارجي أو الوسطي للأنبوب أي $A_{in} = \pi d_i l$ ،$A_{out} = \pi d_{out} l$، $A_m = 0.5\ (A_{in} + A_{out})$، فمثلاً يصبح عامل نفوذ الحرارة منسوباً إلى السطح الوسطي للأنبوب (بدون ترسبات الأوساخ) كما يلي:

$$k_m = \frac{1}{A_{out}/\alpha_{out}A_{out} + (A_m/2\pi\lambda l)\ \ln(d_{out}/d_{in}) + A_m/\alpha_i A_{in}} \qquad (68.4)$$

حيث: d_{out} أو d_{in} القطر الخارجي أو الداخلي للأنبوب $[m]$

l طول الأنبوب $[m]$

λ عامل التوصيل الحراري لمادة الأنبوب $[W/mK]$.

وتصبح الاستطاعة المنتقلة:

$$Q = k_m A_m \Delta t_m \quad [W] \qquad (69.4)$$

حيث: Δt_m فرق درجات الحرارة الوسطى $[K]$.

يبين الجدول (4.4) قيماً تقديرية لعامل نفوذ الحرارة k للمبادلات الحرارية وسطوح التسخين.

يتراوح عامل التوصيل الحراري λ_{dirt} [W/m K] للأوساخ المتجمعة على السطوح الحرارية بين 0.04 و0.07 للهباب وبين 0.6 و2.3 للأملاح (المسماة أحجار المرجل) المتجمعة في الأنابيب وهي غنية بالحصى.

الجدول 4.4: قيم تقديرية لـــ k في المبادلات الحرارية وسطوح التسخين

الوسيط الساخن/البارد	k [W/m² K]	حالات الاستخدام
1. المبادلات الحرارية ذات استعادة الحرارة		
غاز/ هواء 1 bar	35 - 10	أنابيب مسخنات الهواء الأولية
غاز/هواء (عند ضغط عالٍ)	100 - 50	مولدات البخار المضغوطة
غاز (1 bar)/ماء	70 - 15	الموفرات، مراحل استعادة حرارة الغازات
غاز (بضغط عالٍ)/ ماء	170 - 50	مولدات بخار مضغوطة
بخار/ماء	4000 - 1500	المكثفات
2. المبادلات الحرارية المتجددة		
غاز/هواء	15 - 10	مسخنات الهواء الأولية من نوع Ljungström

سطوح التسخين اللازمة

تُحسب سطوح التسخين اللازمة (A) بالاستعانة بالاستطاعة الحرارية المنتقلة Q وعامل نفوذ الحرارة k وفرق درجات الحرارة الوسطي Δt_m.

$$A = Q / k\,\Delta t_m \text{ [m}^2\text{]} \qquad (70.4)$$

أما فرق درجات الحرارة الوسطي فينتج من العلاقة التالية:

$$\Delta t_m = (\Delta t_{max} - \Delta t_{min}) / \ln(\Delta t_{max} / \Delta t_{min}) \qquad (71.4)$$

حيث: Δt_{max} وΔt_{min} الفرق الأعظمي والأصغري لدرجات الحرارة بين المائع الساخن والمائع البارد (انظر المعادلات من 40.1 إلى 43.1).

مثال 5.4

يطلب تحديد مساحة سطح التسخين لمسخن ماء أولي (موفر) يجري تسخينه بغازات الاحتراق، وذلك لمولد بخار استطاعة توليده للبخار 2000 t/h ذي الضغط 250 bar.

درجة حرارة دخول الماء إلى الموفر $t_{W,ent} = 240°C$ ودرجة حرارة خروجه $t_{W,exit} = 320\ °C$.

درجة حرارة دخول الغازات إلى الموفر $t_{G,ent} = 600\ °C$ ودرجة حرارة خروجها $t_{G,exit} = 360\ °C$،

عامل نفوذ الحرارة $k = 56\ W/m^2 K$

الحل

1. من الجدول (A-5) للبخار والماء في الملحق، (وعند الضغط 260 bar و $t_{W,ent}$ و $t_{W,exit} = 320°C$ للماء) يمكن الحصول على انتالبي ماء التغذية عند درجة حرارة الدخول والخروج كما يلي:

$$h_{W,exit} = 1438.6\ KJ/kg$$

أو:

$$h_{W,ent} = 1041.3\ KJ/kg$$

2. التدفق الكتلي لماء التغذية يبلغ:

$$m_W = m_v = 2000 / 3.6 = 555.56\ kg/s$$

3. الاستطاعة الحرارية المتبادلة:

$$Q = m_W\ (h_{W,exit} - h_{W,ent}) = 555.56\ kg/s \times$$
$$(1438.6 - 1041.3)\ KJ/kg = 220.72\ MW$$

4. فرق درجات الحرارة الأعظمي والأصغري في الجريان المتعاكس (Counterflow):

$$\Delta t_{max} = t_{G,ent} - t_{W,exit} = 600 - 320 = 280\ K$$
$$\Delta t_{min} = t_{G,exit} - t_{W,ent} = 360 - 240 = 120\ K$$

5. فرق درجات الحرارة الوسطي لجريان متعاكس :

$$\Delta t_{CF} = (\Delta t_{max} - \Delta t_{min}) / \ln(\Delta t_{max} / \Delta t_{min}) = 188.8\ K$$

6. بمعرفة:

$$P = \Delta t_W / (t_{G,ent} - t_{W,exit}) = (320 - 240) / (600 - 240) = 0.222$$
$$R = \Delta t_G / (t_{G,ent} - t_{W,exit}) = (600 - 360) / (600 - 240) = 0.5$$

وبالتالي ينتج عامل التصحيح $f = 0.5$.

7. من أجل جريان متصالب يصبح فرق درجات الحرارة الوسطي:

$$\Delta t_m = f \cdot \Delta t_{CF} = 0.5 \times 188.8 = 94.4\ K$$

8. ينتج الآن سطح الموفر كما يلي:

$$A = Q/k \,.\, \Delta t_m$$

$$= 220.72 \times 10^6 W / 56\ W/m^2K \times 94.4\ K$$

$$= 41748.6\ m^2$$

6.5.4 دراسة (تصميم) مسخن الهواء الأولي المتجدد

أنواع مسخنات الهواء الأولية

تُخفّض درجة حرارة غازات الاحتراق باستخدامها لتسخين الهواء تسخيناً أولياً، ويؤدي هذا إلى رفع مردود مولد البخار. تتعلق درجة حرارة غازات الاحتراق المغادرة بسطح المسخن الأولي للهواء، ويجب أن لا تنخفض درجة حرارة الغازات إلى حدّ أدنى من درجة تكاثف الغازات، وذلك تحاشياً لخطر الصدأ وتجمع الرواسب والغبار على الصفائح الرطبة. عملياً تكون درجة حرارة غازات الاحتراق المغادرة لمولد البخار أعلى من 110 °C.

تجدر الإشارة إلى أن عيب درجة حرارة الاحتراق الشديدة الارتفاع هو تسببها في زيادة تشكل أوكسيد الآزوت. تصل درجات الحرارة الأعظمية عند إحراق الوقود مع تفريغ الخبث بالحالة السائلة إلى 420 °C وذلك عند إحراق الفحم البني مع طرد الرماد بالحالة الجافة، وإلى 350 °C عند إحراق الوقود الغازي والسائل وإلى 320 °C للفحم الحجري المطحون الذي يطرح رماده بالحالة الجافة وتصل إلى 250 °C لفرشة الوقود السائلة وإلى 150 °C عند إحراق الفحم في المصبّعات.

يُستخدم لمسخنات هواء مولدات البخار في محطات توليد الطاقة نوعان هما: المسخنات المتجددة والمسخنات الاسترجاعية.

مسخنات الهواء الأولية المتجددة

تستخدم في مولدات البخار الكبيرة غالباً مسخنات الهواء المتجددة. للمسخن المتجدد كتلة تخزين تتألف من عدد كبير من الأقنية التي هي عبارة عن شرائح رقيقة من الصاج (سماكتها حوالي 0.5 mm)، وبالتالي فمساحة سطحها كبيرة. هناك نوعان من المسخنات المتجددة:

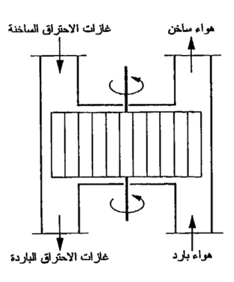
ـــ كتلة التخزين دوارة وموضوعة في غلاف ثابت (ساكن)

ـــ كتلة التخزين ساكنة والغلاف دوّار

يُمرّر على كتلة التخزين أولاً غازات الاحتراق الساخنة ثم هواء بارد، وذلك من خلال الأقنية المخصصة لكل وسيط (الهواء والغاز). مسخن كتلة التخزين بسرعة بسبب سطحها الكبير وبفعل

الحرارة التي تتلقاها من غازات الاحتراق، ثم تقوم بإعطاء الحرارة التي خزنتها إلى تيار الهواء البارد. وبسبب الضغط المرتفع في جهة الهواء مقارنةً بجهة غازات الاحتراق ينشأ تيار تسرب يتم تحاشيه باستعمال حشوات إحكام.

يبين الشكل (18.4) وبشكل تخطيطي مبدأ عمل مسخن الهواء الأولي الدوار من نوع Ljungström له كتلة تخزين بطيئة الدوران. يكون الدّوار ذا محور أفقي أو شاقولي. في النوع المسمى Stator تكون كتلة التخزين ساكنة بينما تدور حولها وصلات الهواء وغازات الاحتراق.



الشكل 18.4 : مخطط يبين مبدأ عمل مسخن الهواء الأولي المتجدد من نوع Ljungström.

مسخن الهواء الأولي الاسترجاعي: تنفذ هذه المسخنات في أكثر الأحيان على شكل أنابيب وأحياناً على شكل صفائح. يحدث انتقال الحرارة بين تيار غازات الاحتراق وتيار الهواء الواجب تسخينه في داخل حزمة الأنابيب عبر جدار الأنبوب، ومن حسنات مسخنات الهواء الأنبوبية عدم وجود أية أجزاء متحركة. تعيق الأوساخ التي تتجمع بفعل الرماد الطيار على سطوح التسخين التيار الحراري المنتقل وترفع ضياع الضغط من جهة غازات الاحتراق.

تحديد سطح التسخين لمسخن الهواء الأولي المتجدد

لتصميم مسخنات الهواء الأولية الاسترجاعية تستخدم القواعد المألوفة لحساب المبادلات الحرارية الاسترجاعية، ولكن حساب المسخنات المتجددة أعقد بكثير، ويمكن أن تحسب بشكل تقريبي بنفس طريقة حساب المسخنات الاسترجاعية كما هم مبين فيما يلي:

يمكن الآن كتابة المعادلات التالية لحساب التيار الحراري Q:

ـــ لتيار غازات الاحتراق

$$Q = m_{G,ent}\, C_{pG}\, (t_{G,ent} - t_{G,exit}) \quad [W] \tag{72.4}$$

ـــ لتيار الهواء

$$Q = m_{A,ent}\, c_{PA}\, (t_{A,exit} - t_{A,ent}) \quad [W] \tag{73.4}$$

حيث: $m_{G,ent}$ أو $m_{A,ent}$ التدفق الكتلي لتيار غازات الاحتراق أو الهواء عند الدخول [kg/s]

c_{pG} أو c_{pA} السعة الحرارية النوعية لغازات الاحتراق أو للهواء [J/kg K]

t_G أو t_A درجة حرارة غازات الاحتراق أو الهواء [°C].

يُحسب سطح التسخين من جهة الهواء أو جهة غازات الاحتراق كما يلي:

$$Q = k_A\, A_A\, \Delta t_m = k_G\, A_G\, \Delta t_m \quad [W] \tag{74.4}$$

حيث: k_A أو k_G عامل نفوذ الحرارة للهواء أو غازات الاحتراق [W/m²K]

A_A أو A_G سطح التسخين لكتلة التخزين من جهة الهواء أو غازات الاحتراق [m²]

Δt_m فرق درجات الحرارة الوسطي بين غازات الاحتراق والهواء [K].

يتم حساب عوامل نفوذ الحرارة وفرق درجات الحرارة الوسطي بين غازات الاحتراق والهواء وفقاً للمعادلات التي وردت في الفصل الأول والفقرة 4.4. كثافة التدفق الكتلي g هي كميات الهواء وغازات الاحتراق الإجمالية التي تعبر المقطع خلال الثانية الواحدة، وتبلغ عادة 6 إلى 8 kg/m²s. يكون عامل نفوذ الحرارة k عندئذ بين 10 و15 W/m² K.

فرق درجات الحرارة $\Delta t_{Hot} \doteq t_{G,ent} - t_{A,exit}$ على الجانب الحار. لمسخن الهواء الأولي (يسمى أيضاً التدرج) يجب أن يكون على الأقل 20 K. فرق درجات الحرارة للهواء $\Delta t_A = t_{A,exit} - t_{A,ent}$ يدعى الحرارة المكتسبة (أي التي تم ربحها). عند معرفة التدفقات الكتلية ومعرفة ثلاث درجات ($t_{G,ent}\ t_{A,ent}\ t_{A,exit}$)، يمكن تحديد درجة الحرارة الرابعة ($t_{G,exit}$) من المعادلات المذكورة أعلاه.

يسبب التيار المتسرب (الضائع) الناشئ بفعل فرق الضغط بين الهواء وغازات الاحتراق والذي يتعلق بتصميم مسخن الهواء الأولي وحجمه، يسبب تخفيض درجة حرارة غازات الاحتراق وتنتج هذه الدرجة كما يلي:

$$t_G = t_{G,exit} - m_{leck} / m_{G,exit}\, (t_{G,exit} - t_{A,exit}) \quad [°C] \tag{75.4}$$

يُحدَّد تيار التسرب m_{Leck} (منسوباً إلى كمية غازات الاحتراق الجافة) بناءً على موازنة للعناصر وذلك عن طريق تحديد هبوط CO_2 في جهة غازات الاحتراق:

$$m_{Leck} = \Delta r_{CO_2}\, m_{G,ent}\,(1 - r_{H_2O}) / (r_{CO_2} - \Delta r_{CO_2}) \quad [kg/s] \tag{76.4}$$

يبلغ هبوط CO_2 أي Δr_{CO_2} في جهة غازات الاحتراق ($0.007 - 0.01\ m^3/m^3$).

يحدَّد الحجمان الجزئيان r_{CO_2} وr_{H_2O} لكل من CO_2 وH_2O من حسابات الاحتراق.

يحسب التدفق الكتلي عند الخروج لغازات الاحتراق وللهواء كما يلي:

$$m_{G,exit} = m_{G,ent} + m_{Leck} \quad [kg/s] \tag{77.4}$$

$$m_{A,exit} = m_{A,ent} - m_{Leck} \quad [kg/s] \tag{78.4}$$

من مساحة المقاطع لغازات الاحتراق A_G وللهواء A_A ينتج المقطع الإجمالي لمسخن الهواء الدوار:

$$A_q = A_G + A_A = (m_{G,ent} + m_{A,ent}) / g \quad [m^2] \tag{79.4}$$

وبإضافة 10 % لمساحة الصاج يصبح قطر مسخن الهواء الأولي:

$$D = 1.1\,(4\,A_q/\pi)^{0.5} \quad [m] \tag{80.4}$$

سيُعرض في المثال 6.4 حساب مسخن هواء أولي من النوع المتجدد.

مثال 6.4

يطلب تحديد سطح التسخين اللازم A وكتلة التخزين m_s والقطر D لمسخن هواء أولي متجدد في مولد بخار عند الشروط التالية:

- التدفق الكتلي عند الدخول لكل من الهواء وغازات الاحتراق: $m_{A,ent} = 765$ kg/s، $m_{G,ent} = 800$ kg/s.
- درجات الحرارة عند الدخول والخروج للهواء: $t_{A,ent} = 30°C$، $t_{A,exit} = 250°C$.
- درجات الحرارة عند الدخول والخروج لغازات الاحتراق: $t_{G,ent} = 350°C$، $t_{G,exit} = 150°C$.
- كثافة التدفق الكتلي: $g = 7.8\ kg/m^2s$.
- عامل النفوذ الحراري للهواء: $k_A = 13\ W/m^2K$.
- السعة الحرارية النوعية للهواء: $c_{pA} = 1.01\ kJ/kg\ K$.

الحل

1. التيار الحراري المتبادل:

$$Q = m_{A,ent}\, c_{pA}\, (t_{A,exit} - t_{A,ent})$$
$$= 764.8 \times 1.01 \times 10^{-3}\, (250 - 30) = 169.94 \text{ MW}$$

2. فرق درجات الحرارة الوسطي بين غازات الاحتراق والهواء:

$$\Delta t_m = (t_{G,ent} - t_{A,exit}) + (t_{G,exit} - t_{A,ent}) / 1$$
$$= (350 - 250) + (150 - 30) / 2 = 110 \text{ K}$$

3. سطح التسخين اللازم من جهة الهواء وكذلك جهة الغازات:

$$A_A = A_G = Q / k_A\, \Delta t_m$$
$$= 169.94 \times 10^6 / 13 \times 110 = 118800 \text{ m}^2$$

4. السطح الإجمالي لمسخن الهواء:

$$A = A_A + A_G = 237600 \text{ m}^2$$

5. إذا كانت سماكة الصاج $\delta = 0.5$ mm وكتلته النوعية $\rho_s = 7800$ kg/m^3 فإن كتلة التخزين للمسخن:

$$m_s = A\, \delta\, \rho_s$$
$$= 237600 \text{ m}^2 \times 0.0005 \text{ m} \times 7800 \text{ kg/m}^3 = 926640 \text{ kg}$$

6. مقطع مسخن الهواء:

$$A_q = (m_{G,ent} + m_{A,ent}) / g$$
$$= (800 + 765) \text{ kg/s} / 7.8 \text{ kg/m}^2 \text{ s} = 200.64 \text{ m}^2$$

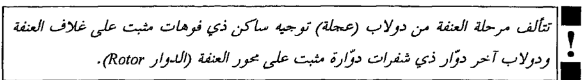
7. يحسب قطر المسخن الآن كما يلي:

$$D = 1.1\, (4\, A_q/\pi)^{0.5}$$
$$= 1.1\, (4 \times 200.64 / \pi)^{0.5} = 17.58 \text{ m}$$

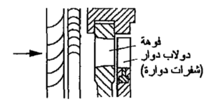
5 العنفات البخارية، المكثفات، مسخنات الماء الأولية، وحدات ماء التبريد

1.5 عنفات أويلر والمعادلة الأساسية

العنفات هي آلات حرارية لتحويل الحرارة إلى طاقة ميكانيكية (عمل) وذلك عن طريق تمدد وسيط عمل (بخار الماء في العنفة البخارية أو غازات الاحتراق في العنفة الغازية). تتألف العنفات عادة من عدة مراحل الشكل (1.5).

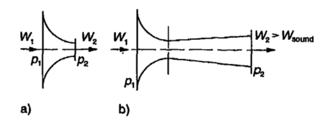


تتألف مرحلة العنفة من دولاب (عجلة) توجيه ساكن ذي فوهات مثبت على غلاف العنفة ودولاب آخر دوّار ذي شفرات دوّارة مثبت على محور العنفة (الدوار Rotor).



الشكل 1.5 : مراحل العنفة.

يتم في فوهة دولاب التوجيه تمدد البخار، يرافق ذلك هبوط في الانتالبي وتحوله إلى طاقة حركية للبخار المتدفق، مما يؤدي إلى تسريعه. يتم الحصول في فوهة مدببة (أي مقطعها متناقص كما في الشكل a2.5) على سرعة للبخار لا تتجاوز سرعة الصوت، وللحصول على سرعة تفوت سرعة الصوت تستخدم فوهة لافال Laval (الشكل b2.5).



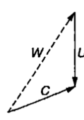
الشكل 2.5 : (a) فوهة بسيطة، (b) فوهة لافال Laval-Nozzle.

تعطى سرعة البخار c في الدولاب الدوار كمجموع شعاعي لمركبتي سرعة (الشكل 3.5) كما يلي:

$$c = u + w \tag{1.5}$$

حيث: u السرعة المحيطية للدولاب الدوار.

w سرعة البخار بالنسبة للدّوار أي في المجرى الموجود بين الشفرات الدوارة.



الشكل 3.5 : مركبات سرعة البخار.

تنتج المركبة المحيطية c_u لسرعة البخار عند مقطع الدخول أو الخروج (الدليل 1 أو 2) للدولاب كما يلي:

$$c_{u2} = C_2 \cos \alpha_2 \quad \text{و} \quad c_{u1} = c_1 \cos \alpha_1 \tag{2.5}$$

حيث: α هي الزاوية بين سرعة الجريان والاتجاه المحيطي.

تُدير قوى دفع تيار البخار الشفرات الدوارة للعنفة. تعطي معادلة أويلر التالية عزم الدوران الناشئ على محور العنفة

$$M = m\,(R_1\, c_{1u} - R_2\, c_u) \quad [\text{Nm}] \tag{3.5}$$

حيث: M التدفق الكتلي للوسيط [kJ/s]

R_1 وR_2 نصف القطر الوسطي لمقطع الدخول والخروج للدولاب الدوّار [m]

c_{1u} وc_{2u} المركبات المحيطية لسرعة البخار عند مقطع الدخول والخروج للدولاب الدّوار [m/s].

يسمى جداء نصف القطر R في المركبة المحيطية الدفع، وهو عزم الدوّران. تؤثر عند مقطع الدخول قوة دفع باتجاه الجريان وعند مقطع الخروج قوة عكس اتجاه الجريان. تنشأ بفعل انحراف الوسيط قوة رد فعل تؤثر على الشفرة.

تطبق العلاقة 3.5 ليس على العنفات البخارية والغازية وحسب وإنما كذلك على آلات الجريان الأخرى (المراوح، المضخات، الضواغط في محطات العنفات الغازية).

تُحدد استطاعة العنفة البخارية بمساعدة معادلة أويلر. تحسب استطاعة مرحلة من العنفة من عزم الدوران M [Nm] وسرعة الدوران ω [1/s] للدولاب الدوّار:

$$P_S = M\omega = m\,(u_1\,c_{1u} - u_2\,c_{2u}) \quad [W] \tag{4.5}$$

تحسب السرعات المحيطية u_1 وu_2 عند مقطع الدخول أو الخروج للدولاب الدوار كما يلي:

$$u_1 = R_1\,\omega \quad \text{و} \quad u_2 = R_2\,\omega \tag{5.5}$$

ينتج العمل النوعي في المرحلة w_{st} لعنفة من الاستطاعة P_{stage} للمرحلة والتدفق الكتلي للوسيط العامل m:

$$w_{stage} = P_{stage} / m = u_1\,c_{1u} - u_2\,c_{2u} \quad [J/kg] \tag{6.5}$$

بإجراء تحويل بسيط للمعادلة أعلاه تنتج معادلة أويلر:

$$w_{stage} = \tfrac{1}{2}\,[(c_1^2 - c_2^2) + (u_1^2 - u_2^2) - (w_1^2 - w_2^2)] \quad [J/kg] \tag{7.5}$$

حيث: w_1 وw_2 مركبات (منسوبة إلى الدوّار) سرعة الجريان عند مقطع الدخول والخروج للدولاب الدوّار [m/s].

عند معرفة السرعات يمكن حساب تحول الطاقة في الدولاب الدوار. بحسب القانون الأول في الترموديناميك يمكن حساب عمل المرحلة النوعي بدون ضياعات كما يلي:

$$w_{st} = \Delta h_{is} + \tfrac{1}{2}(c_1^2 - c_2^2) \tag{8.5}$$

ولحساب هبوط الانتالبي Δh_{is} عند تمدد ايزونتربي في الدولاب الدوار للعنفة نكتب:

$$\Delta h_{is} = h_1 - h_2 = \tfrac{1}{2}[(u_1^2 - u_2^2) - (w_1^2 - w_2^2) \quad [J/kg] \tag{9.5}$$

وبمراعاة مردود الدولاب الدوار η_R تنتج سرعة الخروج خلف الدوار:

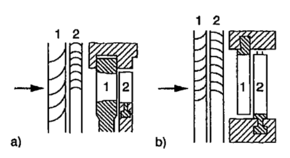
$$w_2 = w_{2is}\sqrt{\eta_R} = \sqrt{\eta_R\,\{\Delta h_{is} + \tfrac{1}{2}[w_1^2 - (u_1^2\ u_2^2)]\}} \quad [m/s] \tag{10.5}$$

2.5 أنواع العنفات البخارية

عنفات الضغط المتساوي والضغط العالي

> **!** *تُقسم العنّفات تبعاً لطريقة اصطدام الوسيط بالشفرات إلى عنفات ضغطٍ متساوٍ وعنفات ضغطٍ عالٍ.*

يبين الشكل (4.5) بشكل تخطيطي مرحلة ذات ضغط متساوٍ وأخرى ذات ضغط عالٍ.



الشكل 4.5 : (a) مرحلة الضغط المتساوي 1 - فوهة 2 - شفرات دوارة،
(b) مرحلة الضغط العالي 1 - شفرات التوجيه 2 - الشفرات الدوارة.

تتألف المرحلة في العنفة من دولاب (عجلة) توجيه ساكن ودولاب دوار ذي شفرات دوارة. يبين الشكل (a5.5) تحولات السرعة وكذلك الضغط في المرحلة الواحدة لعنفة ذات ضغط متساوٍ وأخرى ذات ضغط عالٍ، ويتضح من هذا الشكل أن الضغط في العنفة ذات الضغط المتساوي يتناقص في دولاب التوجيه ويبقى في الدولاب الدوار ثابتاً. تزداد سرعة البخار C في دولاب التوجيه وتتناقص في الدولاب الدوار بحيث يجري البخار عند مدخل الدولاب الدوار ومخرجه بنفس السرعة.

يتحول هبوط الانتالبي للمرحلة Δh_s [J/kg] في عنفة الضغط المتساوي عند تمدد البخار في فوهات دولاب التوجيه إلى طاقة حركية بشكل كامل وتصبح سرعة اندفاع البخار الذي يخرج:

$$w_2 = (\Delta h_{st} + w_1^2)^{0.5} \quad [\mathrm{m/s}] \tag{11.5}$$

تُعرَّف درجة رد الفعل r لعنفة بخارية بأنها نسبة هبوط الإنتالبي في الدولاب الدوّار Δh_R إلى هبوط الإنتالبي للمرحلة كلها Δh_{st}:

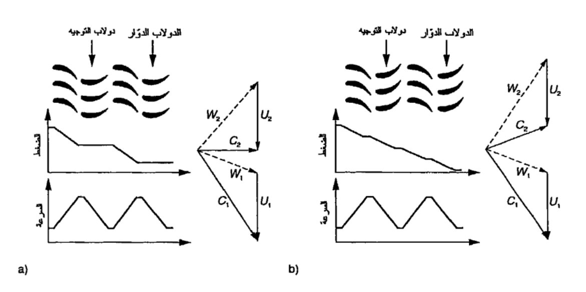
$$r = \Delta h_R / \Delta h_{st} \tag{12.5}$$

إن قيمة درجة رد الفعل في العنفات ذات الضغط المتساوي معدومة (تساوي الصفر).

يتم في مرحلة العنفة ذات الضغط العالي استخدام هبوط الإنتالبي في الدولاب الدوار ودولاب التوجيه:

$$\Delta h_{\text{stage}} = \Delta h_{\text{GB}} + \Delta H_{\text{R}} \qquad (13.2)$$

ويرافق ذلك انخفاض للضغط p في الدولاب الدوار ودولاب التوجيه (الشكل b5.5).



الشكل 5.5 : تحولات السرعة وشكل (بروفيل) الضغط لـــ (a) عنفة ذات ضغط متساوٍ ثنائية المراحل (b) عنفة ذات ضغط عالٍ مؤلفة من مرحلتين.

عندما تكون درجة رد الفعل r مساوية لـــ 0.5 يكون هبوط الإنتالبي في دولاب التوجيه والدولاب الدّوار متساوياً. تتألف مرحلة كورتيس Curtis من دولاب توجيه ودولاب دوار ذي حلقتين. يوجد بين الشفرتين الدوارتين شفرة ساكنة تعكس اتجاه حركة الجريان. يشابه تحول السرعة وشكل (بروفيل) الضغط نظيريهما في مرحلة العنفة ذات الضغط المتساوي.

عدد المراحل

تحسب السرعة المحيطية المثلى للدولاب الدوار u_{opt} من أجل عنفة ذات ضغط متساوٍ أو عالٍ كما يلي:

من أجل العنفة ذات الضغط المتساوي:

$$u_{\text{opt}} = 2c_1 \cos \alpha_1 \qquad (14.5)$$

ومن أجل العنفة التي درجة رد فعلها $r = 0.5$

$$u_{opt} = c_1 \cos \alpha_1 \quad (15.5)$$

تقسم العنفات ذات الاستطاعات العالية إلى ثلاثة أجزاء: ذي الضغط العالي، ذي الضغط المتوسط وذي الضغط المنخفض ويكون لها ثلاثة أغلفة (صناديق).

يحسب هبوط الإنتالبي الأعظمي في مرحلة واحدة لعنفة متساوية الضغط أو ذات ضغط عالٍ عندما تكون قيمة عامل رد الفعل $r = 0.5$ كما يلي:

$$\Delta h_{stage} = \Delta h_{GB} = (2\, c_1 \cos \alpha_1)^2 / 2$$

$$= (2.300)^2 / 2\ (m/s)^2 = 180\ kJ/kg \quad (16.5)$$

و:

$$\Delta h_{stage} = \Delta h_{GB} + \Delta h_R = 2\,(c_1 \cos \alpha_1)^2 / 2$$

$$= (2.300)^2 / 2\ (m/s)^2 = 90\ kJ/kg \quad (17.5)$$

تكون السرعة المحيطية في الجزء ذي الضغط المنخفض من العنفة محدودة بـــ 300 m/s أما في جزئي الضغط المتوسط والعالي فإن السرعة المحيطية أصغر بسبب صغر الحجم النوعي. من أجل سرعة محيطية قيمتها 300 m/s ينتج من أجل الجزء ذي الضغط المنخفض للعنفة ذات الضغط المتساوي أو العنفة ذات الضغط العالي ما يلي:

$$\Delta h_{stage} = (2.300)^2 / 2\ (m/s)^2 = 180\ kJ/kg$$

و:

$$\Delta h_{stage} = (2.300)^2 / 2\ (m/s)^2 = 90\ kJ/kg$$

القيم النمطية (السائدة) لـــ: Δh_{stage} لمرحلة في الأجزاء المرتفعة أو المتوسطة الضغط للعنفة ذات الضغط العالي تتراوح بين 40 و 60 kJ/kg وفي العنفات ذات الضغط المتساوي تكون القيمة هي الضعف.

ينتج عدد المراحل n من هبوط الإنتالبي الإجمالي Δh_{total} والهبوط الوسطي للمرحلة في الجزء ذي الضغط العالي أو المتوسط أو المنخفض للعنفة. يكون عدد المراحل في العنفات ذات الضغط العالي أكبر منه في العنفات ذات الضغط المتساوي.

العنفات ذات التكاثف وعنفات الضغط الخلفي

وفقاً لضغط البخار المغادر للعنفة هناك نوعان من العنفات: الأول ذو تكثيف البخار والثاني ذو الضغط الخلفي. في العنفات ذات تكاثف البخار يحدث تمدد للبخار إلى ضغط أقل من الضغط

الجوي (0.035 – 0.06 bar)، وذلك في مكثف. يتكاثف البخار عند درجة حرارة تقع بين 20 و 30 °C. يبلغ المردود الكهربائي لعملية البخار في العنفات ذات التكاثف حوالي 38 %. هنا يطرح في المكثف مع ماء التبريد حوالي 60 % من طاقة الوقود، وتصرَّف هذه الحرارة إلى الوسط الخارجي. تستخدم العنفات ذات التكاثف من أجل توليد الكهرباء حصراً، أما إذا كان الغرض هو الحصول على طاقة حرارية فتستخدم عنفات ذات سحب البخار (استنـــزافه) عند ضغوط مختلفة.

تتميز العنفات ذات الضغط الخلفي بارتفاع ضغط البخار المغادر للعنفة، وهي تستخدم في المنشآت الصناعية، حيث تتم مواءمة ضغط البخار المغادر للعنفة مع مواصفات البخار المطلوبة لمستهلك البخار أو الحرارة. ولضمان تأمين درجات حرارة المستهلك يكون الضغط عادة حوالي 1 bar. جرّاء ارتفاع ضغط البخار المغادر للعنفة يقلّ العمل المفيد للعنفة ويصبح المردود الكهربائي 30 حتى 35 % فقط. تبلغ قيمة المردود الإجمالي للمنشأة، أي نسبة الطاقة الإجمالية المفيدة (تيار وحرارة عملية أو حرارة تسخين) إلى الطاقة التي يحملها معه الوقود المستخدم: 80 إلى 85 %.

سنتعرض في الفصل الثامن لاستخدام العنفات ذات الضغط الخلفي وللعنفات ذات سحب البخار في محطات توليد الكهرباء والحرارة معاً.

التحكم بالوحدات ذات المكثف

يُحدَّد نوع التحكم السلوك الدنياميكي لوحدة التوليد واستهلاك الحرارة الموافق للحمولة.

وهناك نوعان لطريقة التشغيل أحدهما عند ضغط ثابت والآخر عند ضغط متدرج.

عند التشغيل بضغط ثابت يبقى ضغط البخار المولَّد ثابتاً بصرف النظر عن الحمولة، أما عند التشغيل بضغط متدرج فيتغير ضغط البخار الطازج تبعاً للحمولة.

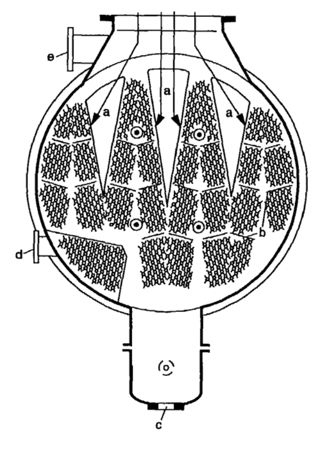
3.5 تصميم المكثفات والمسخنات الأولية لماء التغذية

المكثف – المسخن الأولي لماء التغذية – ساحب الحرارة من البخار المبرد

تستخدم في محطات الطاقة عنفات بخارية ومكثفات للبخار، بالإضافة إلى المسخنات الأولية المتجددة لماء التغذية وساحبات الحرارة من البخار ومبردات الماء المتكاثف، ويستخدم من أجل ذلك المبادلات الحرارية الاسترجاعية التي يجري بها انتقال الحرارة من بخار الماء المتكاثف إلى ماء التبريد أو التسخين أو ماء تغذية المرجل.

لاستغلال الحرارة بشكل أفضل تستخدم في كثير من الأحيان ساحبات الحرارة من البخار ومبردات الماء المتكاثف. يُبَرّد البخار المحمص في ساحب الحرارة من البخار إلى درجة حرارة الإشباع عند ضغط معين، وذلك في مسخن ماء تغذية أولي يلي المحمص. يتم في مبرد الماء المتكاثف سحب الحرارة من البخار المتكاثف (الماء) وإعطاؤها إلى ماء تغذية المرجل، ليتم تسخينه تسخيناً أولياً. إن المكثفات والمسخنات الأولية للماء وساحبات الحرارة من البخار المحمص هي جميعها مبادلات حرارية (heat exchangers) من النوع (ماء ـــ بخار)، أما مبردات الماء المتكاثف فهي مبادلات حرارية من النوع (ماء ـــ ماء).

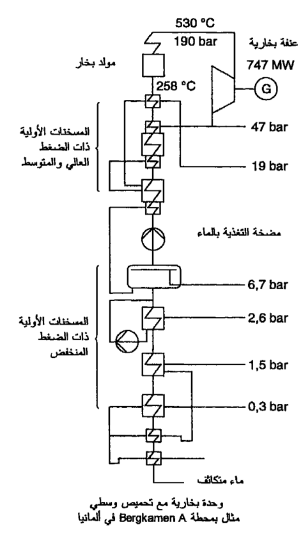
يوضح الشكل (6.5) بشكل تخطيطي مكثف عنفه بخارية.



الشكل 6.5 : مكثف العنفة البخارية (a) فتحات بخار في جدار الأنبوب الحامل (b) صفائح توجيه (c) مخرج السائل المتكاثف (d) مساند امتصاص الهواء (e) فتحة تصريف عند الطوارئ.

من وجهة النظر الترموديناميكة يفضل تسخين ماء تغذية المرجل بشكل أولي بالتكثيف المباشر للبخار المستنـــزف في المسخنات الأولية التي تعمل بالمزج، ومن أجل n مرحلة لتسخين ماء التغذية

يلزم $(n + 1)$ مضخة مياه تغذية، مما يجعل استطاعة تشغيل هذه المضخات كبيرة جداً، ولهذا تستخدم في المنشآت الكبيرة وبشكل رئيسي المسخنات الأولية المقفلة. يتم التسخين الأولي لماء التغذية في خزان ماء التغذية بشكل مماثل تماماً لخلاط التسخين الأولي عن طريق التلامس المباشر بين البخار والماء.



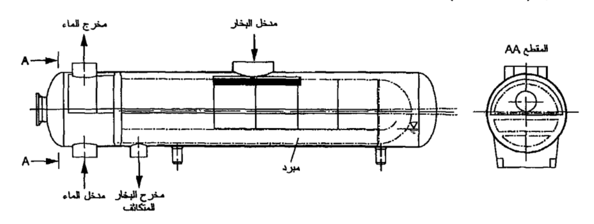
الشكل 7.5 : مخطط التوصيلات لدورتي الماء والبخار.

يجري نقل ماء التغذية بمساعدة مضخة البخار المتكاثف عبر سلسلة من المسخنات الأولية ذات الضغط المنخفض، وبذلك يتم تسخين ماء التغذية من درجة حرارة تكاثف الماء (حوالي 35 °C وبحسب ضغط المكثف) إلى درجة الحرارة 150 °C. تستخدم من أجل التسخين الأولي حرارة تكثيف البخار المأخوذ من العنفة. يرتفع ضغط البخار الساخن من 0.1 إلى 0.2 bar في المرحلة

الأولى إلى حوالي 10 bar في المرحلة الأخيرة ذات الضغط المنخفض قبل خزان ماء تغذية المرجل. يُبرَّد البخار الحار المتكاثف (الماء) أولاً في مبرد خاص ثم يُنقلَ إلى مسخن أولي للماء ذي ضغط بخار منخفض وبهذا يمكن تحقيق ارتفاع محسوس في المردود.

يبين الشكل (7.5) مخطط مبدأ وصل دورة الماء ودورة البخار، بثلاث مسخنات أولية منخفضة الضغط، وبمسخن أولي متوسط الضغط، وبمسخن أولي آخر منخفض الضغط. يوجد قبل كل من المسخن الأولي ذي الضغط العالي أو ذي الضغط المتوسط ساحب حرارة من البخار، حيث يتم فيه تبريد البخار المستترف من المحمص إلى درجة حرارة الإشباع، وتنقل حرارة تحميص البخار إلى ماء التغذية.

والشكل (8.5) يبين تركيب مسخن أولي نمطي ذي ضغط منخفض مع حزمة أنابيب على شكل *U*. يجري ماء التغذية داخل حزمة الأنابيب (جهة الأنبوب) أما بخار التسخين فيجري بين الأنابيب (جهة الغلاف).



الشكل 8.5 : تركيب مسخن أولي ذي ضغط منخفض مع حزمة أنابيب على شكل U.

تستخدم لرفع مردود المنشأة 9 مراحل لتسخين الماء تسخيناً أولياً، وذلك بمساعدة ساحبات حرارة البخار. يتم تبريد البخار المستنـــزف في ساحبات حرارة البخار وإيصاله إلى درجة حرارة الإشباع. يمكن على سبيل المثال رفع درجة حرارة ماء التغذية حتى 322 °C وذلك عن طريق الاستنـــزاف من العنفة البخارية ذات الضغط العالي عند 113 bar وبربط ساحبي حرارة من البخار قبل ذلك لاستنـــزاف البخار من عنفة الضغط المتوسط.

كذلك يمكن وصل ساحبي حرارة من البخار بعد الاستنـــزاف من العنفة ذات الضغط العالي. يمكن ضخ الماء المتكاثف إما إلى المسخنات الأولية للماء التالية ذات الضغط المنخفض أو إلى خط تغذية الماء فوق المسخنات في ساحبات حرارة البخار المنفصلة.

تسحب حرارة التحميص للبخار المستنـــزف وتعطى لماء التغذية عند درجات حرارة عالية وبتدرج منخفض. التدرج ΔT هو الفرق بين درجة حرارة الإشباع للبخار ودرجة حرارة خروج ماء التغذية ويمكن أن يصل إلى K 2 –.

الاستطاعة الحرارية المتبادلة

يمكن حساب الاستطاعة المتبادلة في المكثف، والمسخن الأولي المقفل لماء التغذية وساحب الحرارة من البخار والمنتقلة من البخار إلى الماء من الموازنة الحرارية التالية:

$$Q = m_v (h_V - h_C) = m_W \, c_{P,W} \, (t_{w,out} - t_{w,ent}) \quad [W] \tag{18.5}$$

حيث: m_V و m_W التدفق الكتلي للبخار أو لماء التبريد ولماء تغذية المرجل [kg/s]

h_V وh_C الانتالبي النوعي للبخار وللماء المتكاثف [J/kg]

$C_{P,W}$ السعة الحرارية النوعية للماء [J/kg K]

$T_{w,ent}$ و$t_{w,out}$ درجة حرارة الدخول والخروج للماء [°C].

ويحسب التيار الحراري في مبرد الماء المتكاثف من العلاقة التالية:

$$Q = m_c \, c_{Pc} \, (t_{c,out} - t_{c,ent}) = m_W \, c_{PW} \, (t_{w,out} - t_{w,ent}) \quad [W] \tag{19.5}$$

حيث: m_c أو m_W التدفق الكتلي للبخار المتكاثف أو لماء التغذية [kg/s]

c_{PC} أو c_{PW} السعة الحرارية للبخار المتكاثف أو لماء التغذية [J/kg K]

$t_{c,ent}$ أو $t_{c,out}$ درجة حرارة الدخول والخروج للبخار المتكاثف [°C]

$T_{w,ent}$ و $t_{w,out}$ درجة حرارة الدخول والخروج لماء التغذية [°C].

ويحسب سطح التسخين اللازم للمكثف أو لمسخن ماء التغذية االأولي أو لساحب حرارة البخار كما يلي:

$$A = Q / k \, \Delta t_m \quad [m^2] \tag{20.5}$$

حيث: k عامل نفوذ الحرارة [W/ m² K]

Δt_m فرق درجات الحرارة الوسطي [K].

لحساب فرق درجات الحرارة الوسطي في المكثف أو لمسخن الأولي للماء تطبق المعادلة التالية:

$$\Delta t_m = \Delta t_w / \ln [(t_s - t_{w,ent}) / (t_s - t_{w,exit})] \quad [K] \qquad (21.5)$$

حيث: Δt_w فرق درجات الحرارة لماء التبريد أو التغذية

t_s درجة حرارة الإشباع عند ضغط المكثف أو لمسخن الأولي للماء [°C]

$T_{w,ent}$ أو $t_{w,out}$ درجة حرارة الدخول أوالخروج [°C].

ينتج وفق درجات الحرارة الأعظمي أو الأصغري كما يلي:

$$\Delta t_{max} = t_s - t_{w,ent}$$

أو:

$$\Delta t_{min} = t_s - t_{w,exit} \quad [K] \qquad (22.5)$$

يبين الشكل (9.5) تحولات درجة الحرارة عند سحب لحرارة من البخار أو التكثيف أو التبريد إلى مادون نقطة التكاثف. يقصد بالتدرج في مسخن أولي لماء التغذية أو ساحب لحرارة البخار أو مبرد البخار المتكاثف فرق درجات الحرارة الأصغري بين الموائع (الوسائط) الموجودة في جهة البخار وجهة الماء وتحسب من العلاقة:

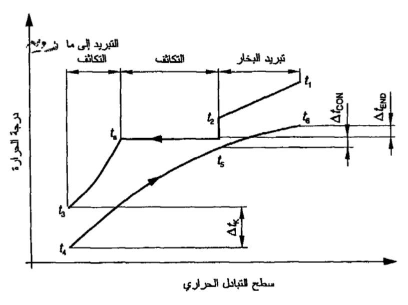
$$\text{التدرج النهائي} \quad \Delta t_{End} = t_s - t_6 \qquad (23.5)$$

ينتج تدرج منطقة التكاثف أو تدرج التبريد إلى مادون التكاثف من العلاقة:

$$\Delta t_{con} = t_s - t_5 \qquad (24.5)$$

أما تدرج التبريد إلى ما دون التكاثف فينتج من العلاقة التالية:

$$\Delta tc = t_3 - t_4 \qquad (25.5)$$



الشكل 5.9 : تحولات درجة الحرارة عند سحب حرارة البخار، التكاثف، التبريد إلى ما دون التكاثف.

عامل نفوذ الحرارة

لحساب عامل نفوذ الحرارة في مكثف أو مسخن أولي للماء أو ساحب لحرارة البخار أو مبرد الماء المتكاثف، وعندما تكون الأنابيب رقيقة، يمكن استخدام المعادلة التقريبية التالية:

$$k = \frac{1}{1/\alpha_{out} + (\delta/\lambda)_{dirt,ext} + (\delta/\lambda)_{w} + (\delta/\lambda)_{dirt,int} + 1/\alpha_{i}} \quad [W/m^2K] \qquad (26.5)$$

حيث: α_i أو α_{out} عامل انتقال الحرارة في الجهة الداخلية أو الخارجية

δ سماكة جدار الأنبوب، أو طبقة الاتساخ

$\lambda_{dirt,ext,int}$ عامل توصيل الحرارة.

الدلائل w، dirt,ext,int تعني جدار الأنبوب وطبقة الاتساخ في الجهة الخارجية وفي الجهة الداخلية. يحسب عامل نفوذ الحرارة عند السطح الوسطي A_m للجدران السميكة للأنابيب من العلاقة التقريبية التالية:

$$k = \frac{1}{A_m/\alpha_{ext}A_{ext} + (A_m/2\pi\lambda l)\ln(d_{ext}/d_{int}) + A_m/\alpha_{int}A_{int}} \qquad (27.5)$$

حيث: A مساحة السطح الخارجي للجدار

d قطر الأنبوب

α عامل انتقال الحرارة

λ عامل توصيل الحرارة

l طول الأنبوب

الدليل *ext* يشير إلى السطح الخارجي لجدار الأنبوب و *int* للسطح الداخلي للجدار.

يتطلب تحديد قيمة k معرفة عوامل انتقال الحرارة للجهة الداخلية والخارجية لكلٍ من المكثف ومسخن الماء الأولي، وساحب الحرارة أو المبرد، ولحسابها تستخدم المعادلات الواردة فيما يلي.

عامل توصيل الحرارة عند تكاثف البخار

تصنّع مكثفات العنفات البخارية عادة بحيث تكون حزمة من الأنابيب الأفقية. ويحسب عامل انتقال الحرارة α_V عند تكاثف غشاء البخار على السطح الخارجي لأنبوب أفقي من المعادلة التالية:

$$\alpha_V = 0.726\,\{\lambda^3 \rho^2 g\, h_{eve} / \mu\,(t_s - t_w)\, d_{ext}\}^{0.25} \quad [W/m^2K] \qquad (28.5)$$

حيث: λ عامل توصيل الحرارة للماء المتكاثف [W/m k]

ρ الكتلة النوعية للبخار المتكاثف [kg/m^3]

g التسارع الأرضي [m/s^2 9.81]

h_{eva} انتالبي التكاثف (تساوي قيمة انتالبي التبخر) [J/kg]

μ اللزوجة الديناميكية للماء المتكاثف [Pas]

t_s درجة حرارة الإشباع [°C]

t_w درجة حرارة جدار الأنبوب [°C]

d_{ext} القطر الخارجي للأنبوب [m].

تؤخذ القيم المميزة للماء المتكاثف (λ، ρ، μ) عند درجة الحرارة الوسطية:

$$t_m = 0.5\,(t_s + t_w)$$

أما انتالبي التكاثف h_{eva} فيؤخذ عند ضغط الماء المتكاثف.

يجب تصحيح المعادلة 28.5 من أجل حزمة أنابيب أفقية تحوي n صفاً من الأنابيب التي تقع فوق بعضها البعض وتحسب قيمة α في هذه الحالة كما يلي:

$$\alpha_B = \alpha / n^{0.17} \quad [W/m^2K] \qquad (29.5)$$

إذا كانت $n < 20$ يمكن عندئذ اعتبار $\alpha_B = \alpha$.

بتكثيف بخار الماء في أنبوب شاقولي وحيد أو في حزمة أنابيب يُحسَب عامل نفوذ الحرارة كما يلي:

$$\alpha_V = 0.943\,\{\lambda^3 \rho^2\ g\, h_{eva} / \mu\,(t_s - t_w)\,H\}^{0.25} \quad [W/m^3K] \qquad (30.5)$$

حيث: H ارتفاع الأنبوب أو حزمة الأنابيب [m].

عامل انتقال الحرارة الداخلي

ينتج عامل انتقال الحرارة α_{int} من أجل جريان داخلي للماء في أنابيب مكثف أو مسخن أولي للماء أو ساحب لحرارة البخار أو مبرد للماء من علاقة رقم نوسل التالية:

$$\alpha_i = N u\, \lambda / d_i \qquad (31.5)$$

حيث: Nu رقم نوسل

λ عامل توصيل الحرارة للماء

d_i القطر الداخلي للأنبوب.

يُحسب رقم نوسل من أجل جريان مضطرب لماء التبريد في المكثف وفي المجال $Re > 2320$ و $Pr = 1.5 - 500$ كما يلي:

$$Nu = 0.012\,(Re^{0.87} - 280)\,Pr^{0.4}\,[1 + (d_i / L)^{2/3}]\,(Pr/Pr_w)^{0.11} \quad (32.5)$$

حيث: $Re = w\,d_{int} / \nu$ رقم رينولدز

w سرعة الجريان

d_{int} القطر الداخلي للأنبوب [m]

ν اللزوجة الحركية للماء المتكاثف [m²/s]

L طول الأنبوب [m]

P_r أو Pr_w رقم برانتل للماء عند درجة حرارة متوسطة t_m أو عند درجة الجدار t_w.

تؤخذ القيم المميزة (λ، ν) ورقم برانتل Pr عند درجة وسطية للماء $t_m = 0.5\,(t_{w,ent} + t_{x,exit})$.

يبين الجدول (1.5) قيماً استرشادية لعامل نفوذ الحرارة والتدرج ΔT من أجل مسخنات الماء الأولية وساحبات حرارة ومبردات المكثف.

الجدول 1.5: عامل نفوذ الحرارة K والتدرج ΔT لمسخنات الماء الأولية وللمبردات ولساحبات الحرارة من البخار

المبادل الحراري	k بالـ [W/m² K]	[K] ΔT
مسخن ماء أولي ذو ضغط عالٍ	4500 – 3500	من 1 إلى 4
مسخن ماء أولي ذو ضغط منخفض (P>bar1)	3500 – 2500	من 3 إلى 5
مسخن ماء أولي ذو ضغط منخفض (P<bar1)	2500 – 1500	من 3 إلى 5
ساحب حرارة البخار لمسخن الماء الأولي	1000 – 400	
مبرد الماء المتكاثف ذو الضغط العالي	4000 – 2500	من 5 إلى 10
مبرد الماء المتكاثف ذو الضغط المنخفض	3000 – 2500	من 5 إلى 10

ضياع (هبوط) الضغط في مكثف عنفة بخارية

يتألف ضياع الضغط الإجمالي Δp من جهة ماء التبريد في مكثف من الضياع في الأنبوب بفعل الاحتكاك Δp_{fr} وضياعات الضغط عند وصلات دخول ماء التبريد وخروجه ($\Delta p_{CW,ent}$ و $\Delta p_{CW,exit}$) وضياعات الضغط عند مدخل الأنبوب ومخرجه (Δp_{ent} و Δp_{exit})

$$\Delta p = \Delta p_{fr} + \Delta p_{CW,ent} + \Delta p_{CW,exit} + \Delta p_{ent} + \Delta p_{exit} \quad [Pa] \quad (33.5)$$

أما ضياع الاحتكاك في الأنبوب فهو:

(34.5) $$\Delta p_f = \lambda\,(L / d)\,\rho\, w^2 / 2 \quad [Pa]$$

حيث: λ عامل الاحتكاك في الأنبوب

L و d طول الأنبوب وقطره [m]

ρ الكتلة النوعية لماء التبريد [kg/m³]

w سرعة ماء التبريد [m/s].

ومن أجل الأنابيب الملساء هيدروليكياً (مثلاً النحاس الأصفر) تطبق العلاقة التالية:

(35.5) $$\lambda = 0.3164 / Re^{0.25}$$

حيث: $Re = w\,d/\nu$ رقم رينولدز

ν اللزوجة الحركية للماء [m²/s]

تحدد المقاومات المختلفة $\Delta p_{CW,ent}$، $\Delta p_{CW,exit}$، Δp_{ent} و Δp_{exit} كما يلي:

(36.3) $$\Delta p = \xi\,\rho\, w^2 / 2 \quad [Pa]$$

كما تحسب عوامل المقاومة ξ كما يلي:

$$\xi_{ent} = 0.25 - 0.3;\ \xi_{exit} = 0.5 - 0.6$$

$$\xi_{cw,ent} = (1 - A_{ent} / A_{w,ent})^2$$

(37.5) $$\xi_{cw,exit} = 0.42\,(1 - A_{exit} / A_{w,exit})$$

حيث: A_{ent} و A_{exit} مساحة المقطع الإجمالية لوصلات دخول ماء التبريد أو خروجه

$A_{w,ent}$ أو $A_{w,exit}$ المساحة الإجمالية لأرضية حجرة الماء عند الدخول أو الخروج.

يشكل ضياع الضغط في الأنابيب حوالي 80 % من ضياعات الضغط الإجمالية في المكثف.

4.5 وحدات ماء التبريد

يتم طرح حرارة التكاثف من المكثف عن طريق ماء التبريد، وينتج التيار الحراري المطروح من الموازنة الحرارية للمكثف:

(38.5) $$Q_R = m_v\,\Delta h = m_W\, c_{pw}\,\Delta t_w \quad [W]$$

حيث: Q_R التدفق الكتلي للبخار [kg/s]

Δh فرق الإنتالبي بين البخار والبخار المتكاثف [J/kg]

m_W التدفق الكتلي لماء التبريد [kg/s]

c_{pw} السعة الحرارية النوعية لماء التبريد [J/kg K]

Δt_w فرق درجات الحرارة لماء التبريد بين مخرج المبرد ومدخله [K].

من أجل سطح تبريد معلوم A في مكثف فإن فرق درجات الحرارة لماء التبريد يحسب كما يلي:

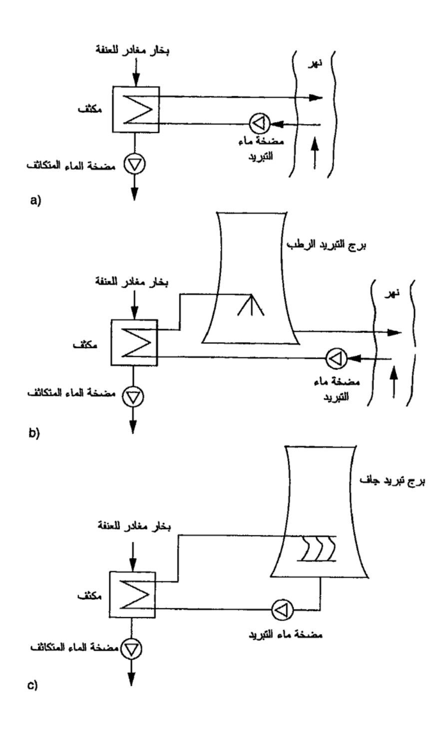
$$\Delta t_W = t_{w,exit} - t_{w,ent} = (t_S - t_{w,ent}) - [1 - \exp(-k\,A/m_W\,c_{pw})] \quad [K] \tag{39.5}$$

حيث: $t_{w,exit}$ أو $t_{w,ent}$ درجة حرارة الخروج أو الدخول لماء التبريد في المكثف [K]

t_S درجة حرارة الإشباع عند ضغط المكثف [°C]

K عامل نفوذ الحرارة [W/m^2K].

يبين الشكل (10.5) وحدات تبريد الماء المستخدمة في محطات الطاقة بشكل تخطيطي، ثمة ثلاثة أنواع من وحدات التبريد ذات الماء الجاري وذات الماء المنفلت (الضائع) وذات الماء الذي يعاد تدويره. يبين الشكل (a10.5) الوحدة ذات الماء الجاري. يؤخذ الماء من التيار الجاري ويُنقى من الشوائب الميكانيكية ثم يضخ إلى مكثف العنفة، ومن هناك يعاد ماء التبريد الذي أصبح دافئاً إلى النهر ثانية. من وجهة النظر الترموديناميكية فإن هذه الوحدة هي الأفضل، ولكن ذلك يشكل عبئاً حرارياً على الماء، ولذلك لا تُستخدم إلا بشكل محدود. أما في الوحدة ذات المائع الضائع (الشكل b10.5) فيوصل بعد المكثف وقبل الوصول إلى مجرى الماء الرئيسي برج تبريد رطب، وتكمن ميزة هذه الطريقة في قلة الحرارة المنقولة إلى مجرى الماء (النهر)، أما عيبها فهو التكاليف الإضافية لبرج التبريد. الطريقتان المذكورتان أعلاه مناسبتان فقط في المواقع التي تتوافر فيها المياه بكميات كافية. أما في وحدة التبريد من النوع الثالث، أي ذات الماء الذي يعاد تدويره، فيجري تبريد ماء التبريد في برج جاف أو رطب ثم يعاد سوقه إلى المكثف ثانية. يجري تعويض ضياعات الماء التي تحصل في برج التذرير بالتطاير أو التذرير أو مع الأوحال عن طريق إضافة مياه جديدة. ويبين الشكل (c10.5) وحدة تبريد الماء ذات إعادة تدوير الماء مع برج تبريد جاف، وتعتبر هذه الطريقة أسلوب تبريد جاف غير مباشر. وبهذا يُساق ماء التبريد من مكثف العنفة إلى برج تبريد جاف عبر مكثف سطحي (مقفل) أو مكثف حقن بعد أن يكون بُرِّد بالهواء المحيط ثم يُعاد إلى مكثف العنفة ثانيةً.



الشكل 10.5 : (a) وحدة تبريد الماء ذات الماء الجاري (b) وحدة تبريد الماء ذات الماء الضائع (c) وحدة تبريد الماء ذات إعادة تدوير الماء.

يستخدم في وحدات التبريد الهجينة (المختلطة) بشكل ممتاز خليط من التبريد الجاف والرطب. تستخدم في محطات الطاقة لإرجاع ماء التبريد إلى مكثف العنفة أبراج تبريد جافة ورطبة.

يُرَش في برج التبريد ماء التبريد الساخن (تدفقه الكتلي m_w [kg/s] ودرجة حرارته t_w) فيتطاير جزء صغير من الماء (Δm_w) مما يؤدي إلى تناقص درجة حرارة ماء التبريد. عن طريق إضافة ماء إضافي (بتدفق Δm_w ودرجة حرارة t_w) فإن كمية الماء المغادر من ماء التبريد تكون مساوية لـ m_w ولها درجة حرارة $t_{w,ent}$. يسخن تيار الهواء الصاعد في برج التبريد (تدفقه الكتلي m_A بالـ kg من الهواء الجاف في الثانية) وترتفع رطوبته وتزداد قيمته الانتالبي ومحتوى الرطوبة للهواء من القيم المقابلة للهواء الخارجي h_1 و x_1 إلى قيم توافق الخروج من برج التبريد h_2 [جول لكل كغ هواء جاف] وx_2 (كغ بخار ماء لكل كغ هواء جاف).

من موازنة الكتل في برج التبريد الرطب ينتج التدفق الكتلي لماء التبريد المتطاير أو كمية الماء اللازم إضافتها:

$$\Delta m_w = m_A (x_2 - x_1) \quad [kg/s] \qquad (40.5)$$

ومن الموازنة الحرارية لجملة التبريد التي تتألف من المكثف وبرج التبريد الرطب، تنتج استطاعة التبريد.

$$Q = m_w \, c_{pw} \, \Delta t_w$$
$$= m_A \, \Delta h_A - m_w \, c_{pw} \, \Delta t_w \quad [W] \qquad (41.5)$$

حيث: $\Delta h_A = h_2 - h_1$ ارتفاع الإنتالبي للهواء في برج التبريد [J لكل kg هواء جاف].

ومنه ينتج استهلاك الماء الإضافي المنسوب لكل 1 kg من ماء التبريد

$$\Delta m_w / m_w = c_{pw} \, \Delta t_w / (\Delta h_A / \Delta x_A - c_p \, \Delta t_w) \quad [kg/kg] \qquad (42.5)$$

بالمقارنة مع وحدة التبريد ذات الماء الجاري ينتج أن استهلاك الماء المضاف يبلغ 1.5 إلى 2 %.

على سبيل المثال، من أجل محطة طاقة وقودها الفحم البني واستطاعتها الكهربائية 880 MW يستخدم برجا تبـــريد ارتفاعهما 162 m وتصل حدود التبريد إلى 9 K. التدفق الكتلي لماء التبريد m_w = 27879 kg/s. عند تصميم أبراج التبريد الرطبة فإن فرق درجات الحرارة لماء التبريد Δt_w يعتبر عرض منطقة التبريد،كذلك يعتبر الفرق في درجات الحرارة بين الماء البارد والهواء الجاف حدّ التبريد. يجب أن تقدم مضخات ماء التبريد عندما يكون عرض منطقة التبريد 8.16 K كمية من الماء البارد قدرها 10^5 t كل ساعة (m_w = 27876 kg/s).

تُقَاد غازات الاحتراق المغادرة للمولد في مشاريع محطات الطاقة الحديثة إلى الوسط الخارجي بحيث تكون أعلى من أبراج التبريد. هناك الأنواع التالية من أبراج التبريد الجافة:

ـــ وحدة مبردة بشكل مباشر مع تكثيف.

ـــ وحدة مبردة بشكل غير مباشر بدون تكثيف.

ـــ أبراج تبريد ذات تهوية قسرية عن طريق مراوح.

ـــ أبراج تبريد ذات سحب طبيعي.

والأبراج الأكثر شيوعاً هي الأبراج الرطبة ذات السحب الطبيعي، وفي حالات قليلة تستعمل الأبراج الرطبة مع مراوح.

مثال 1.5

يطلب تحديد مساحة التبريد والتدفق الكتلي لماء التبريد لمكثف عنفة بخارية عند الشروط التالية:

ـــ الاستطاعة الكهربائية للمحطة $P_{el} = 700$ MW

ـــ المردود الكهربائي η_{el} للمحطة 40 %

ـــ ضغط المكثف 0.05 bar

ـــ درجة حرارة الدخول و الخروج لماء التبريد في المكثف هي 16 و 26 °C

ـــ عامل نفوذ الحرارة $k = 2300 \text{W/m}^2 \text{K}$.

الحل

1. درجة حرارة الإشباع عند الضغط $p = 0.05$ bar تبلغ 33 °C ≈ 32.898 (انظر الجدول A5 في الملحق).

2. فرق درجات الحرارة الوسطي بين البخار والماء:

$$\Delta t_m = (\Delta t_{max} - \Delta t_{min}) / \ln (\Delta_{max} / \Delta t_{min})$$
$$= [(133 - 16) - (33 - 26)] / \ln [(133 - 16) - (33 - 26)] = 11.3 \text{ K}$$

3. الاستطاعة الحرارية التي تطرح من المكثف مع ماء التبريد (Q_r) تحسب من الفرق بين الاستطاعة الحرارية المضافة والاستطاعة الكهربائية

$$Q_r = Q_{ad} - P_{el} = P_{el} / \eta_{el} - P_{el}$$
$$= 700 \text{ MW} / 0.40 - 700 \text{ MW} = 17150 - 700 = 1050$$

4. سطح التبريد اللازم في المكثف:

$$A = Q_R / \text{k } \Delta t_m$$
$$= 1050 \times 10^6 \text{ W} / 2300 \text{ W/m}^2\text{k} \times 11.3 \text{ k} = 40400 \text{ m}^2$$

5. السعة الحرارية النوعية لماء التبريد عند درجة حرارة وسطية $(16 + 26) / 2 = 21°C$ تبلغ J/kgK 4182 (انظر الجدول 14.A في الملحق).

6. التدفق الكتلي لماء التبريد يصبح:

$$m_W = Q_R / C_{pw} \Delta t_w$$
$$= 1050 \times 10^6 \text{ W} / 4182 \text{ J/kgK} \times (26 - 16) \text{ K}$$
$$= 25107.6 \text{ kg/s} = 90387 \text{ t/h}$$

6 تخفيض إطلاق محطات الطاقة لغازات الاحتراق الضارة

1.6 إطلاق غاز ثاني أوكسيد الكربون CO_2

انبعاث الغازات الضارة

عند إحراق الوقود المستحاثي في محطات توليد الطاقة فإنه يتم إطلاق غاز ثاني أوكسيد الكربون ذي التأثير الكبير على المناخ بالإضافة إلى الغازات الضارة التالية:

— من وقود الفحم: ثاني أوكسيد الكبريت SO_2، أكاسيد النتروجين (الآزوت) NO_x، أول أوكسيد الكربون CO، المركبات الهالوجينية مثل HFI وHCI، الغبار بالإضافة إلى الخبث والرماد.

— من الوقود السائل (زيت الوقود): SO_2، NO_x، CO، الهيدروكربونات C_mH_n والهباب (soot).

— من الغاز الطبيعي: NO_x، CO، C_mH_n.

لا يحتوي الغاز الطبيعي على كبريت، وكذلك لا ينطلق عند الاحتراق الكامل إلاّ NO_x، أما CO وC_mH_n فهي تتشكل فقط عند الاحتراق غير الكامل، ويمكن تخفيض إصدار NO_x وCO و C_mH_n في المنشآت التي تحرق الوقود الغازي بشكل كبير عن طريق إجراءات احتراق مناسبة. أي أنه يمكن اعتبار الغاز الطبيعي وقوداً نظيفاً، ولكن للأسف فإن احتياطي الغاز الطبيعي صغير نسبياً. كما أن أنواع الوقود الغازي الأخرى، مثل الغازات الناتجة عن تغويز الفحم (تحويله إلى غاز) تعتبر أيضاً رفيقة بالبيئة بعد معالجتها.

يتشكل عند إحراق الوقود السائل مقدار أكبر بكثير من الغازات الضارة، وذلك مقارنة بالوقود الغازي. وعلى سبيل المثال فعند إحراق الوقود السائل (فيول أويل) الخفيف (EL) الذي يحوي قدراً

صغيراً جداً من الكبريت مقارنة بالوقود الثقيل، عندئذ تنطلق بشكل رئيسي NO_x، بينما يكون إطلاق SO_2 مرتفعاً نسبياً عند إحراق الوقود الثقيل.

تؤذي الفحوم، وخاصة الفحم البني البيئة بأكبر درجة، وذلك مقارنة بأنواع الوقود الأخرى. ومنتجات الزيوت المعدنية أكثر رفقاً بالبيئة، أما الغاز الطبيعي فيمكن إحراقه بإطلاق ضئيل جداً للغازات الضارة (مثلاً في منشآت العنفات الغازية).

إن الغازات الضارة الناتجة عن الاحتراق في معدات الاحتراق ومحطات توليد الطاقة والمواصلات تؤذي الهواء والماء والأرض، وتؤثر مباشرة على هواء التنفس وماء الشرب والأغذية، وعلى الإنسان والحيوان، وأبعد من ذلك فهي تضر عالم النبات وتؤذي الأبنية.

وقد بلغ انبعاث الغازات الضارة من محطات توليد الطاقة في ألمانيا عام 1990 (بملايين الأطنان/العام) كما يلي: الغبار 0.17، SO_2 :1.96، NO_x: 0.93، C_mH_n: 0.01، ويمكن تخفيضها باستخدام إجراءات أولية (مرتبطة بالوقود وطريقة إحراقه)، أو إجراءات ثانوية (مرتبطة بغازات الاحتراق الناتجة). كذلك يجب التخلص من المياه الملوثة والفضلات الناتجة عن معدّات معالجة غازات الاحتراق بشكل ملائم للبيئة.

انبعاث CO_2 النوعي

غاز ثاني أوكسيد الكربون CO_2 غاز مهم للمناخ، وهو يساهم في التسخين الإجمالي للأرض حيث يلعب دور البيت الزجاجي على الأرض. يجب تقليل انبعاث CO_2 بحدود 50 %، ولا يمكن الوصول إلى ذلك إلا عن طريق الإقلال من استهلاك الوقود. لهذا يجب رفع مردود عمليات تحويل الطاقة واستخدامها بشكل كبير.

يُحسَب مقدار الـــ CO_2 المنطلق لكل 1 MJ من الحرارة المتحررة بالاحتراق كما يلي:

$$g_{CO_2} = V_{CO_2} \rho_{CO_2} / \text{LCV} \quad [\text{kg/MJ}] \tag{1.6}$$

حيث: V_{CO_2} كمية غاز ثاني أوكسيد الكربون [m^3 لكل 1 kg وقود صلب أو سائل لكل m^3 وقود غازي]

ρ_{CO_2} الكتلة النوعية عند الشروط النظامية (1.977 kg/m^3)

LCV القيمة الحرارية الدنيا [MJ لكل 1 kg وقود صلب أو سائل أو لكل m^3 وقود غازي].

يحسب الانبعاث النوعي لـــ CO_2 من محطة توليد طاقة لكل 1 kWh من الطاقة الكهربائية المقدمة كما يلي:

$$g'_{CO_2} = 3.6 V_{CO_2} \rho_{CO_2} / LCV\ \eta_{ps}$$

$$= 3.6\ g_{CO_2} / \eta_{ps} \quad [kg/kWH] \qquad (2.6)$$

حيث: η_{ps} مردود محطة توليد الطاقة.

كلما ارتفع مردود محطة الطاقة، قلّ الانبعاث النوعي لـــ CO_2 من أجل كل 1 kWh لهذه المحطة، ولذلك فإن رفع المرود إجراء مهم لتقليل إصدار CO_2.

الجدول 1.6: القيم المحسوبة للانبعاث النوعي لـــ CO_2 — g_{CO2} بالـــ kg/MJ وكذلك g'_{CO_2} بالـــ kg/kWh لمختلف أنواع الوقود

نوع الوقود	LCV	η_{ps}	V_{CO_2}	g_{CO_2}	g'_{CO_2}
فحم بني	9.63	0.36	0.56	0.1147	1.1147
فحم حجري	31.4	0.40	1.5	0.0949	0.854
وقود سائل خفيف	42.7	0.44	1.61	0.0751	0.615
غاز طبيعي	37.5	0.44	1.07	0.0554	0.54

مثال 1.6

يطلب حساب مقدار CO_2 المنطلق لكل 1 MJ طاقة حرارية متحررة أو لكل kWh استطاعة كهربائية من أجل محطات الطاقة التي تحرق أنواعاً مختلفة من الوقود. يعطي الجدول (1.6) القيم الحرارية الدنيا لأنواع الوقود LCV (بالـــ MJ لكل kg وقود صلب أو سائل أو لكل 1 m^3 وقود غازي) وكذلك كمية غاز ثاني أوكسيد الكربون V_{CO_2} المنطلقة (بالـــ m^3 لكل kg وقود صلب أو سائل أو لكل 1 m^3 وقود غازي) وكذلك القيم المحسوبة لـــ g_{CO_2} و g'_{CO_2}.

الحل

تعطي المعادلات 1.6 و 2.6 القيم التالية:

مثلاً للفحم البني: $g_{CO_2} = 0.56 \times 1.977 / 9.63 = 0.1147$ kg/MJ

$$g'_{CO_2} = 3.6 \times 01147 / 0.36 = 1.147 \text{ kg/kWh}$$

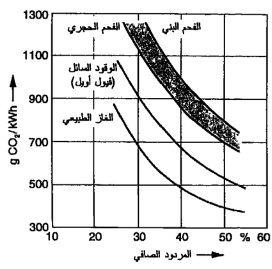
بطريقة مماثلة تحسب هذه القيم من أجل أنواع الوقود الأخرى، والنتائج مبينة في الجدول (1.6).

أما الجدول (2.6) فيتضمن معطيات عن القيم العملية للانبعاث النوعي لـــ CO_2 لمحطات الطاقة المختلفة التي تحرق أنواعاً مختلفة من الوقود.

الجدول 2.6: الانبعاث النوعي لـ CO_2 من محطات الطاقة [kg/kWh]

نوع محطة الوقود	الاستطاعة [MW]	الوقود المستخدم	انبعاث CO_2[kWh]
محطة بخارية مزودة بمعدات تنقية غازات الاحتراق	800	فحم بني	1.16-1.04
محطة بخارية مزودة بمعدات تنقية غازات الاحتراق	700	فحم حجري	0.83
محطة دارة مركبة (بخارية + غازية) يحول الفحم فيها إلى غاز	300	فحم بني	0.91
محطة دارة مركبة يُحوَّل الفحم فيها إلى غاز	300	فحم حجري	0.79
محطة بخارية	400	وقود سائل ثقيل	0.76
محطة عنفة غازية	150	غاز طبيعي	0.58
محطة بخارية	400	غاز طبيعي	0.45
محطة دارة مركبة	600		0.38
محطة نووية ـــ المفاعل ذو الماء المضغوط	1300		0.025
محطة شمسية	حتى 80		0.15-0.1
منشأة فوتوفولطية	حتى 6		0.2-0.15
منشأة طاقة الرياح	حتى 3		0.02
محطة مائية	20		0.004

يمكن تخفيض انبعاث CO_2 عن طريق رفع مردود محطة الطاقة أو الاستعاضة عن وقود معين بوقود آخر. يكون الانبعاث أعظمياً عند إحراق الفحم البني وأصغرياً عند إحراق الغاز الطبيعي.



الشكل 1.6 : الإصدار النوعي لمحطات توليد الطاقة وعلاقته بالمردود الصافي وبنوع الوقود.

يبين الشكل (1.6) تخطيطياً الانبعاث النوعي لمحطة الطاقة وعلاقته بالمردود الصافي وبنوع الوقود.

بلغ إجمالي إصدار العالم من CO_2 عام 1990 القيمة التالية: Mio t/a 22108 (طن/العام)، نصيب الولايات المتحدة منها (بملايين الأطنان/العام) 5389، وأوروبا 4674 والاتحاد السوفيتي السابق 1006، واليابان 1153 وتعتبر عملية تخفيض انبعاث CO_2 أمراً يجب إيلاؤه بالغ الاهتمام. بلغ الإطلاق الإجمالي لمحطات الطاقة في ألمانيا عام 1990 (بملايين الأطنان/العام) t/a 348.

سنعالج فيما يلي الوسائل الهندسية لسحب الغبار والكبريت والآزوت من غازات الاحتراق.

2.6 سحب الغـــبار

أنواع ساحبات الغبار

تنطلق من أجهزة الاحتراق في الغالب البقايا التالية: رماد خشن أو خبث أو رماد متطاير أو غبار ناعم. تتعلق كميات هذه المواد بتركيب الوقود وطريقة إحراقه، وينطلق الجزء الأكبر من الغبار عند إحراق الفحم والخشب والقمامة. لتقليل انبعاث الغبار تستخدم الساحبات التالية:

- ساحبات الغبار باستخدام قوة الثقالة وقوة العطالة.
- الساحبات الدوارة التي تستخدم القوة النابذة.
- المصافي الكهربائية والمصافي النسيجية (خيوط نسيجية).
- المصافي الرطبة.

درجة السحب (التنقية)

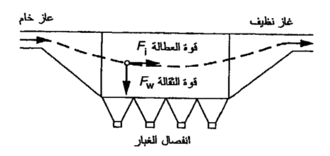
تحدد درجة السحب كما يلي:

$$\eta_{Fil} = (1 - b_1 / b_2)\ 100\ \% \qquad (3.6)$$

حيث: b_1 أو b_2 نسبة تواجد الغبار في غازات الاحتراق عند مدخل ساحب الغبار وعند مخرجه $[g/m^3]$.

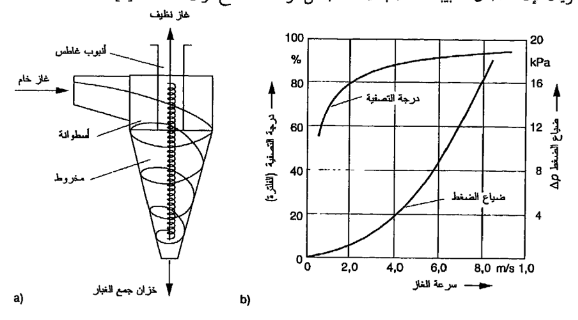
ساحبات الغبار باستخدام قوة الثقالة (فلاتر الثقالة)

تتبع مصافي (فلاتر) الثقالة والعطالة لزمرة المصافي الكتلية التي تقسم بناءً على القوة المؤثرة على عملية التصفية (الفلترة) إلى مصافي الثقالة والعطالة والقوة النابذة (الشكل 2.6).



الشكل 2.6 : مبدأ عمل المصافي الكتلية.

تتعلق درجة السحب (الفلترة) في مصافي قوة الثقالة بفرق الكثافة بين الغاز والحبيبات الصلبة وبفترة بقاء غازات الاحتراق في المصفاة. إذا تعرض مزيج الغاز والحبيبات الصلبة إلى تغيير في اتجاه الجريان فإن انفصال الحبيبات الصلبة يحدث بفعل قوة الثقالة مع قوى العطالة *[1].



الشكل 3.6 : السيكلون (الساحبات الدورانية) (a) مخطط مبدأ العمل (b) درجة التصفية وضياع الضغط.

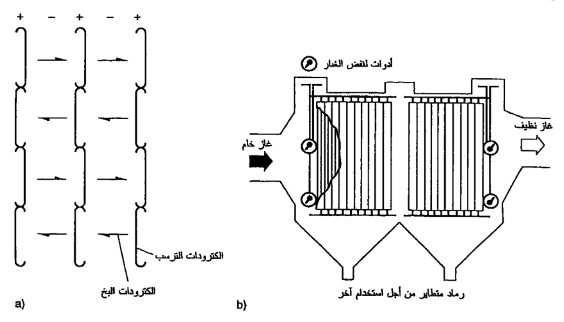
ساحبات الغبار الدورانية (السيكلون)

تعتمد على فرق الكثافة الكبير بين الغاز والحبيبات الصلبة وهي مناسبة لتصفية الحبيبات الكبيرة (الشكل 3.6).

* رقم المرجع (مبين في آخر الكتاب) ــ المراجع.

المصافي الكهربائية

يستخدم لهذه المصافي توتر (جهد، ضغط) كهربائي عالٍ، وهي تقوم بفصل حبيبات الغبار من تيار غازات الاحتراق. ومبدؤها مبين في الشكل (4.6).



الشكل 4.6 : المصافي الكهربائية (a) مخطط مبدأ العمل (b) التركيب.

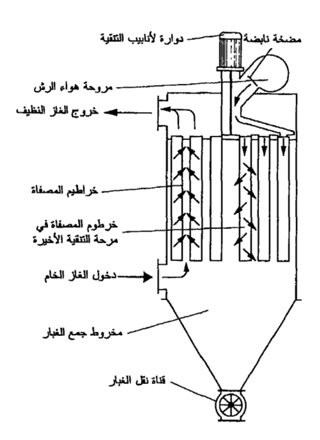
تتألف المصفاة الكهربائية من أقطاب متوازية مشحونة إيجابياً (صفائح رقيقة مؤرضة) وبُرادة مشحونة سلباً تتوضع بين الصفائح. تنشأ في المصفاة عند مرود غازات الاحتراق عملية تأين (تحول إلى شوارد ذات شحنة كهربائية) لهذه الغازات فتقوم الالكترونات الأولية الحرة بطرد الكترونات أخرى من جزئيات الغاز (ظاهرة كورونا). إذا مُرِّرت غازات الاحتراق بالغبار بين الصفائح فإن جزيئات الغاز المشحونة سلبياً تتجمع معاً مشكلةً جسيمات. تنتقل هذه الجسيمات إلى الأقطاب الموجبة حيث تفقد شحنتها هناك وتسقط في خزان جمع حبيبات الغبار. أما حوامل الشحنات الموجبة من الغازات فتتجمع على أقطاب البرادة. يبين الشكل (b4.6) تركيب مصفاة كهربائية.

هذه المصافي مناسبة لسحب الجسيمات التي تتراوح أبعادها بين 10^{-3} و10 µm.

تتعلق درجة التصفية (الفلترة) لمصفاة كهربائية بالتدفق الحجمي للغازات V وبسرعة حركة الحبيبات الصلبة في الغازات w وبمساحة سطح الترسب A وفقاً للمعادلة التالية:

$$\eta_{Fil} = 1 - \exp(-wA / V) \qquad (4.6)$$

تعمل معظم المصافي الكهربائية عند درجة حرارة لغازات الاحتراق قدرها 140 °C.



الشكل 5.6 : المصفاة النسيجية (ألياف).

المصافي النسيجية

يتم فصل الحبيبات الصلبة من غازات الاحتراق في هذا النوع من المصافي عن طريق طبقة ذات مسام، وبناءً على المتطلبات تستخدم خيوط من منتجات طبيعية أو من الزجاج أو المعادن. (انظر الشكل 5.6). يتم تصميم (اختيار) المصفاة النسيجية (ذات الألياف) بناءً على سطح المصفاة المعرض لغازات الاحتراق، وتتحمل المصافي ذات الألياف المصنوعة من الزجاج أو التفلون (مادة لدائنية عازلة صامدة للحرارة والرطوبة) درجة حرارة الغازات التي تبلغ 260 °C.

الجدول 3.6: مجالات انبعاث مختلف طرائق التصفية.

طريقة التصفية ـــ الجهاز	درجة التصفية	مجال الانبعاث
المصفاة الكهربائية	%99.5 > عندما $d > 10\mu m$	mg/m^3 30 >
	%90.5 > عندما $d < 10\mu m$	
المصفاة النسيجية	%99.5 > لأنعم حبيبات من الغبار	mg/m^3 20 – 10
الساحبات الدورانية (السيكلون)	%99 > للغبار الخشن ($d > 20\mu m$)	150 mg / m عندما d>20μm
	%40 > للغبار الخشن ($d < 5\mu m$)	

مقارنة درجات السحب (التصفية)

يبين الجدول (3.6) درجات التصفية لمختلف طرائق التصفية والأجهزة المستعملة لذلك.

3.6 سحب الكبريت (desulpherization)

تشكل SO_2

يتفاوت تشكل ثاني أوكسيد الكبريت في معدات الاحتراق تبعاً لنوع المنشأة وطريقة الاحتراق ونوع الوقود المستخدم. ينطلق SO_2 بشكل رئيسي من أجهزة حرق الفحم والوقود السائل. في حراقات الوقود السائل والغازي ينبعث عملياً كل الكبريت المحمول مع الوقود، بينما يرتبط جزء من الكبريت بالرماد عند إحراق الفحوم.

لتخفيض انبعاث SO_2 من محطات الطاقة التي تحرق الوقود المستحاثي (الأحفوري) يتم اللجوء إلى استخدام أنواع من الوقود قليلة المحتوى من الكبريت، أو إلى سحب الكبريت من الوقود قبل حرقه، أو إلى سحب الكبريت من الغازات الناتجة عن الاحتراق. يمكن بمعالجة ميكانيكية مناسبة للفحم سحب الكبريت المرتبط في البيريت (FeS) جزئياً فقط (5 إلى 30 %) من الفحم، أي أن محتوى الفحم من الكبريت ينخفض من 1.3 إلى 1 %.

طرائق سحب الكبريت من غازات الاحتراق ونواتجها النهائية

في جميع طرائق سحب الكبريت من غازات الاحتراق لمحطات الطاقة يتم امتصاص (absorption) أو امتزاز (adsorption) ثاني أوكسيد الكبريت الموجود في غازات الاحتراق بمساعدة مواد كيمائية فعالة. وفي أكثر الأحيان يجري سحب الكبريت من غازات الاحتراق عن طريق تحويل كيميائي لـ SO_2 بمساعدة مادة ماصّة لتشكيل الكبريتات أو الكبريتيت. من وسائط الامتصاص هناك $CaCO_3$ (الحجر الكلسي) و CaO (الحجر الكلسي المحروق) و $Ca(OH)_2$ (الكلس المطفأ) بالإضافة إلى مواد أخرى مثل NH_3 وNa_2SO_3 أو $NaOH$. ويُميَّز بين الطريقة الرطبة (Absorption) ونصف الرطبة والجافة.

أما النواتج فهي تختلف بحسب وسيط الامتصاص، فهناك الجص، عنصر الكبريت، ثاني أوكسيد الكبريت السائل، حمض الكبريت، كبريتات الأمونيوم، كبريتيت الكالسيوم. وفي أغلب الأحيان يستخدم الحجر الكلسي في طريقة غسيل غازات الاحتراق، ويكون الناتج النهائي هو الجص

(الجبس) ($CaSO_4H_2O$). يتم تحول SO_2 إلى جص بنسبة 96 إلى 99 % في المرحلة المائية كتفاعل تأين عند قيمة مثلى لـ pH.

في طريقة الامتزاز ينتج من غازات الاحتراق المحملة بالكبريت وبمساعدة وسيط الامتزاز (الذي هو غالباً الفحم المنشط) عنصر الكبريت، ثاني أوكسيد الكبريت السائل، أو حموض الكبريت، تتجدد قابلية وسيط الامتزاز (الفحم المنشط) عند درجة الحرارة 300 إلى 600 °C.

درجة سحب الكبريت

تنتج درجة سحب الكبريت في منشأة سحب الكبريت من غازات الاحتراق من العلاقة التالية:

$$\eta_{deSO_2} = (1 - c_{Cl} / c_{Ra})\ 100\ \% \qquad (5.6)$$

حيث: c_{Ra} أو c_{Cl} تركيز SO_2 في الغاز الخام والغاز النظيف حسب الحال أي عند مدخل ومخرج محطة المعالجة [mg/m^3].

في أجهزة الإحراق الكبيرة ذات الغسيل بالطريقة الرطبة لسحب الكبريت من غازات الاحتراق تزيد درجة السحب عن 90 %.

1.3.6 سحب الكبريت من غازات الاحتراق مع إنتاج الجص

طريقة غسيل غازات الاحتراق بالحجر الكلسي

في طريقة غسل الغازات هذه مع إنتاج الجص يُمرّر الغاز بعد تنقيته في المصفاة الكهربائية عبر غسّالة تكون على شكل برج غسيل بالرذاذ. عند إجراء التفاعل في مرحلة واحدة يدور ماء الغسيل ماراً عبر منطقة الامتصاص في دورة، كما يتم سوق الهواء.

يبين الشكل (6.6) بشكل تخطيطي منشأة سحب الكبريت من غازات الاحتراق لمحطة طاقة تحرق الفحم في Lippendorf في ألمانيا. الأرقام المبينة على الشكل توافق استطاعة قدرها 750 MW.

تُمرَّر غازات الاحتراق قبل وصولها إلى المدخنة على مسخن أولي للغاز من النوع Ljungström فتسخن من الدرجة 55 إلى 110°C.

تحدث في هذه التفاعلات التالية وينتج الجص:

$$SO_2 + {}^1/_2\, O_2 = SO_2 \qquad (6.6)$$

$$CaCO_3 + H_2O = Ca(OH)_2 + CO_2 \qquad (7.6)$$

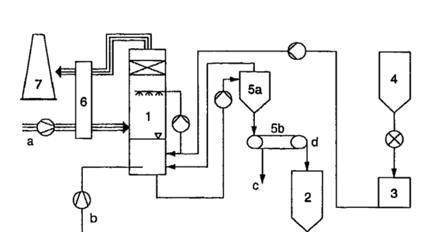
(8.6) $$Ca(OH_2) + SO_3 + H_2O = CaSO_4\,2H_2O$$

ومجموع التفاعلات السابقة هو:

(9.6) $$SO_2 + CaCO_3 + {}^1/_2O_2 + 2H_2O = CaSO_42H_2O + CO_2$$

والموازنة المولية لهذا التفاعل هي:

$$64 + 100 + 16 + 36 = 172 + 44 \quad [kg/kmol]$$



الشكل 6.6 : منشأة لسحب الكبريت من غازات الاحتراق وإنتاج الجص. محطة توليد الطاقة بالفحم Lippendorf استطاعة وحدة التوليد 750 MW كمية الفحم 220 t/h مقدار الانبعاث 400 mg/m³ محتوى الفحم من الكبريت 1.3 % وزناً.

كمية الحجر الكلسي والجص

يمكن حساب كمية الحجر الكلسي اللازمة $CaCO_3$ وكتلة الجص بالطريقة التالية:

عند إحراق وقود محتواه من الكبريت S (kg/kg) يتشكل $2\,S$ kg من SO_2 لكل kg وقود.

ويلزم لكل kg واحد من SO_2 في غازات الاحتراق 100/64 kg من $CaCO_3$. إذا عُلِم استهلاك الوقود m_F ومحتواه من الكبريت S تنتج كتلة $CaCO_3$ اللازمة من أجل درجة معينة معطاة لسحب الكبريت η_{deSO_2}.

(10.6) $$m_{CaCO_3} = 100 / 64 \times 2 \times S / 100\ m_F\ \eta_{deSO_2}$$

عند استخدام مستحلب الكلس $Ca(OH)_2$ يحدث تفاعل سحب الكبريت التالي:

(11.6) $$2SO_2 + 2Ca(OH)_2 + 2H_2O + O_2 = 2CaSO_4\,2H_2O$$

$$2 \times 64 + 2 \times 74 + 2 \times 18 + 32 = 2 \times 172$$

من 1 kg SO_2 يتشكل 172/64 kg من $CaSO_4\,2H_2O$ (الجص).

ومن 56 kg CaO (الحجر الكلسي المحروق) وبعد حلّه في 18 kg ماء (H_2O) يتشكل 74 kg مستحلب كلسي $Ca(OH)_2$. هذا يعني أنه من 1 kg كلس محروق يتشكل 74/56 kg مستحلب كلسي، وبالتالي فإنه يلزم لكل kg واحد SO_2 مقدار 74/64 kg من $Ca(OH)_2$ أو 56/64 kg من CaO.

مثال 2.6

في منشأة لسحب الكبريت من غازات الاحتراق في محطة طاقة تبلغ قيمة تدفق غازات الاحتراق $V_G = 175 \times 10^6$ m³/h محتوى الغازات من SO_2 قبل مرورها في المنشأة $C_{ra} = 10000$ mg/m³ وبعد المغادرة تصبح $C_{CL} = 400$ mg/m³. ما هو الاستهلاك الساعي للكلس المحروق (CaO) والإنتاج الساعي للجص؟

الحل

1. كمية SO_2 في الساعة الواجب سحبها في الممتص من غازات الاحتراق تبلغ:

$$m_{SO_2} = V_G\,(c_{ra} - c_{CL})$$
$$= 1.75 \times 10^6\ \text{m}^3/\text{h}\ (10000 - 400)\ \text{mg/m}^3 = 16800\ \text{kg/h}$$

2. الاستهلاك الساعي للكلس المحروق:

$$m_{CaO} = 56 / 64 \times 16800\ \text{kg/h}$$
$$= 14.7\ \text{t/h}$$

3. الإنتاج الساعي للجص:

$$m_{Gypsum} = 172 / 64\ m_{SO_2} = 172 / 64 \times 16800\text{kg/h}$$
$$= 45.15\ \text{t/h}$$

2.3.6 سحب الكبريت من غازات الاحتراق مع إنتاج الكبريت

هناك الطريقة الرطبة التي يكون وسيط الامتصاص فيها NaOH، وطريقة الامتزاز حيث يستخدم الفحم المنشط، وينتج في المحصلة عنصر الكبريت، وثاني أوكسيد الكبريت السائل وحمض

الكبريت. يمكن على سبيل المثال ذكر الطريقة الرطبة Wellman - Lord، التي يجري فيها امتصاص SO_2 عن طريق (Na_2SO_3) الذي تلامسه غازات الاحتراق عند أرضية الجهاز التي يرسل منها محلول وسيط الامتصاص على شكل قطرات اتجاه حركتها معاكس لاتجاه حركة غازات الاحتراق. يرتبط SO_2 بمحلول (Na_2SO_3) كيميائياً ويتشكل ($NaHSO_3$). أما تجديد وسيط الامتصاص فيتم عن طريق تمرير البخار فيه في منشأة خاصة. عندئذ ينطلق SO_2 مع بخار الماء، ثم تتم معالجته بحيث يخرج على شكل غاز، فتبقى Na_2SO_3 الذي يستخدم بعد تجهيزه لسحب الكبريت ثانية من غازات الاحتراق. يجري تمييع غاز SO_2 الناتج حتى يمكن استخدامه في الأغراض الصناعية (مثلاً لإنتاج المنظفات، الورق، السكر) أما الرماد المتطاير الذي هو مزيج من كبريتات النشادر $(NH_4)_2SO_4$ فتتم معالجته لإنتاج السماد الآزوتي.

الجدول 4.6: مواصفات منشأة سحب الكبريت (طريقة Wellman-Lord) لمحطة Buschhaus. الاستطاعة الكهربائية MW 350، الوقود: فحم بني قيمته الحرارية الدنيا LCV = 8 – 12 MJ/kg، محتواه من الفحم 3.5 % - 2.

الوصف	القيم
تركيز SO_2 [mg/m^3]*	
قبل مرور الغاز على ساحب الكبريت (غاز خام)	10 000-20 000
بعد مروره على ساحب الكبريت (غاز نظيف)	< 40
كمية SO_2 [t/a] (طن بالسنة)	
قبل مرور الغاز على ساحب الكبريت (غاز خام)	180 000
بعد مروره على ساحب الكبريت (غاز نظيف)	6 000
استهلاك محلول كربونات الصوديوم الطبيعية مع 50 % NaOH [t/a]	10 000
النواتج الثانوية لسحب الكبريت من غازات الاحتراق	
الكبريت S	80 000
كبريتات الصوديوم Na_2SO_4	10 000

* عند الشروط النظامية، لغازات الاحتراق الجافة، O_2 6%.

يعطي الجدول (4.6) مواصفات منشأة سحب الكبريت من محطة توليد الطاقة في Buschhaus (في ألمانيا).

معادلات التفاعل هي:

$$SO_2 + NaOH = NaHSO_3 \quad (12.6)$$

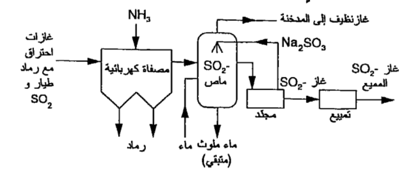
$$NaHSO_3 + {}^1/_2\, O_2 = NaHSO_4 \quad (13.6)$$

(14.6) $$SO_2 + 2NaOH + {}^1/_2\, O_2 = Na_2SO_4 + H_2O$$

أما تحويل كبريتات الصوديوم إلى جص فيجري وفق المعادلة التالية:

(15.6) $$Na_2SO_4 + Ca(OH)_2 = 2NaOH + CaSO_4$$

يبين الشكل (7.6) مخطط منشأة لسحب الكبريت تنتج أيضاً غاز SO_2 المميع.



الشكل 7.6 : مخطط منشأة لسحب الكبريت تنتج غاز SO_2 المميع. محتوى الرماد الطيار الناتج عن الاحتراق 150 mg/m^3، الغاز النظيف حوالي 0 - 10 mg/m^3، محتوى غازات الاحتراق من SO_2 حوالي 3500 mg/m^3 وفي الغاز النظيف حوالي 300 إلى 350 mg/m^3. يستخدم غاز SO_2 المميع في:

- صناعة المنظفات
- صناعة الورق
- صناعة المواد الغذائية

4.6 سحب النيتروجين (الآزوت) (DENOX)denitrification

تقانة تقليل أكاسيد النتروجين NO_x

يتعلق انبعاث NO_x عند الاحتراق بمحتوى الوقود من النتروجين وبطريقة الاحتراق. يؤدي استخدام الوقود ذي المحتوى العالي من النتروجين إلى انبعاث عالٍ لـ NO_x، كما يزداد انبعاث أكاسيد الآزوت NO_x مع ارتفاع درجة حرارة حجرة الاحتراق وارتفاع درجة حرارة مسخن الهواء الأولي، وكذلك مع زيادة عامل فائض الهواء.

يمكن التمييز بين الإجراءات الأولية والثانوية لتقليل انبعاث NO_x، إذ تقوم الإجراءات الأولية على اختيار نوع الوقود (تُفضَّل الأنواع قليلة النتروجين) وعلى كيفية إحراقه. الإجراءات المرتبطة بطريقة إحراق الوقود تتضمن الإحراق على مراحل واسترجاع غازات الاحتراق. يقصد بالإحراق على مراحل إرسال كلٍّ من الهواء والوقود إلى الحرّاق تدريجياً (على مراحل)، ويؤدي هذا إلى تقليل

انبعاث NO_x بحدود 10 إلى 20 %، هذا ويجب استخدام الاحتراق على مراحل واسترجاع غازات الاحتراق في نفس الوقت.

شروط ذلك هي إنقاص عامل زيادة الهواء وتخفيض مقدار التسخين الأولي للهواء وإقلال إجهاد حجرة الاحتراق.

يمكن معرفة مردود إجراءات طريقة الإحراق على إنقاص انبعاث NO_xمن الجدول (5.6). أما مدلول رموز تقانات إقلال انبعاث NO_x المستخدمة والمذكورة في الجدول فهي كما يلي: (1) استخدام الحراقات ذات الانبعاث القليل لـــ No_x، (2) استخدام الإحراق على مراحل، (3) استخدام عملية استرجاع غازات الاحتراق.

الجدول 5.6: مردود الإجراءات المستخدمة في عملية الإحراق لتخفيض انبعاث NO_x.

الوقود/طريقة الإحراق	الإجراءات الأولية	انبعاث $NO_x[mg/m^3]$
مسحوق الفحم	1	800 – 600
الإحراق بالطريقة الجافة	3 + 2 + 1	400 – 200
مسحوق الفحم	1	1800 – 1300
التخلص من الرماد بالطريقة المائعة	3 + 2 + 1	1000 – 400
فرشة الوقود الدوامية المستقرة		600 – 300
فرشة الوقود الدوامية الدوّارة		250 – 100
إحراق الوقود السائل	3	600 – 400
	3 + 2 + 1	200 – 100
إحراق الوقود الغازي	3	400 – 300
	3 + 2 + 1	100 – 50

آلية تشكل أكاسيد النتروجين (الآزوت)

ينشأ عند احتراق الوقود المستحاثي NO وNO_2 من النتروجين الموجود في هواء الاحتراق والنتروجين المرتبط بالوقود، ويُشار إلى مجموع NO و NO_2 بـــ NO_x. يمكن التمييز بين ثلاث آليات لنشوء NO:

— NO الحراري

— NO الآني (Prompt)

ـــ NO الذي مصدره الوقود

أوكسيد الآزوت NO الحراري

ينشأ بفعل الأكسدة الجزئية لجزيئات النتروجين الموجودة في هواء الاحتراق عند بقائها لفترة طويلة في حيز تفوق درجة حرارته 1300 °C، وذلك وفقاً للمعادلات التالية (بحسب Zeldo Vich مع انتالبي التفاعل ΔH):

(16.6) $$N_2 + O = NO + N \quad ، \quad \Delta H = 315.2 \text{ kJ/mol}$$

(17.6) $$N + O_2 = NO + O \quad ، \quad \Delta H = -134.4 \text{ kJ/mol}$$

يزداد تشكل NO الحراري مع ارتفاع درجة الحرارة بشكل أسي ويتناسب مع تركيز الأوكسجين في منطقة الاحتراق.

أوكسيد الآزوت NO الآني

يكون نشوء NO الآني في الشعلة (بحسب Fenimore) قليل الأهمية. تتأكسد روابط نيتروجين الوقود بعد اختزالها إلى روابط سيانيد (H_mC_nN) أو إلى NH_3 لتشكل NO.

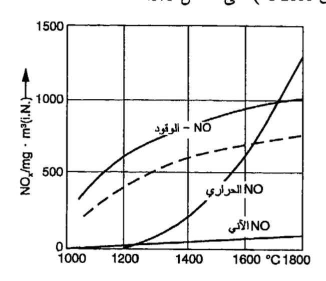
ينشأ NO- الوقود نتيجة تأكسد جزئي للنتروجين المرتبط بشكل عفوي في الوقود، وهو ينطلق حتى عند درجات الحرارة المعتدلة أثناء تفكك الوقود الحراري (Pyrolysis) ثم يتحول إلى NO_x و N_2. تساهم هذه الآلية عند إحراق مسحوق الفحم بتشكيل 50 إلى 70 % من NO- الوقود. من أجل فحم حجري محتواه من الآزوت 1.2 % فإن 75 % من NO_x المتشكل سببه نيتروجين الوقود، وعند إحراق هذا الوقود وتصريف رماده بالحالة الجافة وباستخدام حراقات قليلة الإصدار لـــ NO_x تكون كمية NO_x في غازات الاحتراق 800 mg/m^3.

أوكسيد الآزوت NO الذي مصدره الوقود

يتأثر تشكل NO- الوقود بالمقادير التالية:

- محتوى الوقود من الآزوت (بسبب المحتوى من N، يسيطر تشكل الـــ NO الحراري في النفط والغاز الطبيعي).
- محتوى الوقود من المركبات الطيارة مثل HCN، NH_3... إلخ.
- التركيز المرتفع للأوكسجين في بعض مناطق حجرة الاحتراق.
- مدى تناقص (اختزال) NO بفعل فحم الكوك المتبقي والأسس (Radicals).

عند إحراق الفحم الحجري وتصريف الخبث بالحالة المائعة تكون درجة حرارة الاحتراق 1450 إلى 1800 °C، ويكون قسم كبير من الـــ NO حرارياً (40 حتى 60 %). وإذا كان التخلص من الخبث بالحالة الجافة فإن درجة حرارة الاحتراق أدنى بـــ 100 إلى 300 K ويكون NO الحراري المتشكل فقط 10 إلى 30 % من الكمية الإجمالية. يبين الشكل (8.6) تأثير درجة حرارة حجرة الاحتراق (من 1000 إلى 2000 °C) على تشكل NO.



الشكل 8.6 : تأثير درجة حرارة حجرة الاحتراق على عملية تشكل NO.

بما أن التوازن الترموديناميكي للتفاعل:

$$NO + {}^1/_2\, O_2 = NO_2 \qquad (18.6)$$

يقع عند درجات حرارة تزيد على 650 °C على الجانب الأيسر من المعادلة السابقة، فإنه ينبعث في معظم عمليات الاحتراق NO (فوق الـــ 95 %). وعند درجات حرارة أقل من 650 °C (كذلك عند الضغط الجوي) يتم تحول NO إلى NO_2، وهذا يتعلق بنسبة وجود O_2 في غازات الاحتراق وفترة بقائهما معاً.

تبلغ نسبة NO في NO_x الإجمالي الذي تطلقه حراقات محطات الطاقة 95 % أما NO_2 تبلغ نسبته 5 % فقط.

1.4.6 منشأة سحب الآزوت (DENOX) من غازات الاحتراق

يتم تحرير غازات الاحتراق بواسطة الإجراءات الثانوية من SO_2 بشكل شبه كامل. ولسحب NO_x هناك منشآت خاصة يستخدم منها نوعان SNCR وSCR.

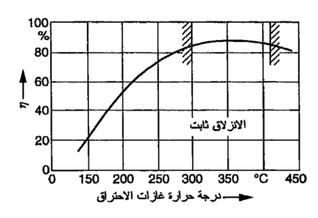
درجة سحب الآزوت

تنتج درجة سحب الآزوت من المعادلة:

(19.6)	$\eta_{DENOX} = (1 - c_{CL} / c_{Ra})\ 100\ \%$

حيث: c_{Ra} وc_{CL} تركيز NO_x في الغاز الخام والنظيف حسب الحال، أي عند مدخل منشأة سحب الآزوت ومخرجها [mg/m³].

يبين الشكل (9.6) درجة سحب الآزوت بالنسبة لدرجة حرارة غازات الاحتراق. درجة الحرارة المثلى تقع بين 300 و 400 °C.



الشكل 9.6 : درجة سحب الآزوت وارتباطها بدرجة حرارة غازات الاحتراق.

طرائق التوضع

يتم تركيب معدات سحب أكاسيد النتروجين في محطات الطاقة في واحد من ثلاثة مواقع حسب الحال:

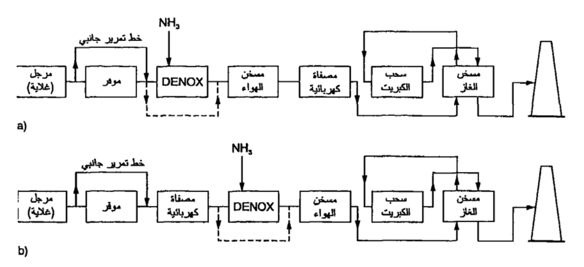
— سحب الآزوت من الغازات الساخنة والمحملة بالغبار (High-dust).

— سحب الآزوت من الغازات الساخنة غير المحملة بالغبار (Low-dust).

— سحب الآزوت من الغازات الباردة.

في المنشآت التي تتعامل مع غاز ساخن محمل بالغبار توضع معدات سحب الآزوت من الغازات بعد سطح التسخين الرئيسي لمولد البخار مباشرة بين الموفّر (ECO) ومسخن الهواء . يمرر قسم من الغازات الساخنة المحملة بالغبار على الموفر للمحافظة على درجة حرارة التشغيل اللازمة لعمل الحفّاز (Catalytic Converter) وهي تقع بين 300 و 400 °C. ويستمر الحفّاز صالحاً للاستخدام

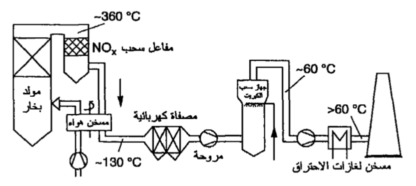
لمدة 12 000 ساعة عمل. يُركب خلف جهاز سحب الآزوت كلٌ من مسخن الهواء و فاصل الغبار (المصفاة الكهربائية) ومعدات سحب الكبريت والمسخن الأولي المتجدد لغازات الاحتراق.



الشكل 10.6: توضّح منشأة سحب أكاسيد الآزوت DENOX (a) قبل مسخن الهواء والمصفاة الكهربائية ومعدات سحب الكبريت (b) خلف المصفاة الكهربائية وقبل مسخن الهواء ومعدات سحب الكبريت.

في النوع الثاني الذي يعالج غازات الاحتراق الساخنة ذات المحتوى القليل من الغبار (الشكل b10.6) يركب جهاز سحب الآزوت بعد فاصل الغبار (المصفاة الكهربائية)، ويلي ساحب NO_x مسخن الهواء الأولي وجهاز سحب الكبريت ثم مسخن غازات الاحتراق. أما في النوع الثالث الذي يعالج غازات الاحتراق الباردة غير المحملة بالغبار فيركب جهاز سحب الآزوت بعد جهاز سحب الكبريت، وقبل ذلك تسخّن غازات الاحتراق في المسخن إلى درجة الحرارة 300 °C.

يبين الشكل (11.6) مخطط المنشأة التي يركب فيها جهاز سحب أكاسيد الآزوت قبل مسخن الهواء الأولي بشكل مبسط.



الشكل 11.6 : مخطط وصل مولد البخار مع جهاز سحب أكاسيد الآزوت قبل مسخن الهواء الأولي.

طريقة SCR لسحب أكاسيد الآزوت من غازات الاحتراق (Selective Catalytic Reduction)

تقلل طريقة التخفيض الانتقائي لأكاسيد الآزوت في غازات الاحتراق بواسطة الحفاز (مُعجِّل التفاعل) انبعاث أوكسيد الآزوت عن طريق تفاعل محفز غير متجانس لأوكسيد الآزوت مع وسيط (يكون عادة الأمونياك NH_3) عند درجات حرارة تتراوح بين 300 و400 °C، وبهذا يتحول NO إلى آزوت وماء. يتألف الحفاز من مادة أساسية (Al_2O_3، TiO_2 أو السيليكات) مطلية بروابط من الفاناديوم، الموليبديوم، التيتانيوم، التنغستين. يأخذ الحفّاز شكل أنابيب أو صفائح أو أطباق (صينية). إذا كانت غازات الاحتراق محملة بشكل قليل بالغبار، فإنها تُمرَّر على الحفّاز بشكل أفقي (أو شاقولي إذا كانت عالية المحتوى من الغبار).

التفاعل الرئيسي الذي يؤدي إلى تخفيض NO بطريقة SCR هو:

$$NO + NH_3 + {}^{1}/_{4}\, O_2 = N_2 + 1.5\, H_2O \qquad (20.6)$$

الكتلة المولية لـــ NO هي (30 kg/kmol) ولـــ NH_3 هي (17 kg/kmol)، فإذا كان التدفق الحجمي لغازات الاحتراق V_G [m³/h] وأردنا تخفيض تركيز NO_x في غازات الاحتراق من c_{Ra} إلى c_{CL} [mg/m³] فإن كمية NH_3 اللازمة تكون:

$$m_{NH3} = 17 / 30\ V_G\,(c_{Ra} - c_{CL})\ 10^{-6} \quad [kg/h] \qquad (21.6)$$

مثال 3.6

ما هي كمية NH_3 اللازمة لسحب الآزوت من غازات الاحتراق إذا كان ($V_G = 1.75 \times 10^{-6}$ m³/h) باستخدام طريقة SCR وكان تركيز NO_x في الغاز الخام $c_{Ra} = 750$ mg/m³ وفي الغاز النظيف $c_{CL} = 150$ mg/m³؟ الحجوم معطاة عند الشروط النظامية.

الحل

الاستهلاك الساعي لـــ NH_3:

$$m_{NH_3} = 17 / 30\ 1.75 \times 10^{6}\ m^3/h\ (750 - 150)\ mg/m^3$$

$$= 595\ kg/h$$

تتعلق درجة سحب أكاسيد الآزوت في طريقة SCR بفعالية سطح الحفّاز وبزمن تلامس غازات الاحتراق مع الحفاز، ويمكن الوصول إلى درجة تنقية 95 %.

من أجل تشغيل آمن يجب ألا يتجاوز تركيز NH_3 المتبقي في غازات الاحتراق عند مغادرة جهاز سحب NO_x القيمة 5 ppm، وإلاّ يمكن أن تنشأ ترسبات وإشكالات في مسخن الهواء الأولي والمصفاة الكهربائية وجهاز سحب الكبريت. عند إقلاع مولد البخار تقاد غازات الاحتراق الباردة عبر مجرى جانبي (Bypass) حول مفاعل الـــ SCR.

لا تطرأ عملياً أية إشكالات عندما يوصل مفاعل الـــ SCR بعد جهاز سحب الكبريت بشرط ضمان خلو غازات الاحتراق بعد جهاز سحب الكبريت من HCl وHF وتسخين الغازات قبل وصولها إلى جهاز سحب الآزوت DENOX إلى درجة الحرارة 300 وحتى 400 °C.

طريقة SNCR لسحب الآزوت من غازات الاحتراق (Selective Non-Catalytic Reduction)

تقلل طريقة التخفيض الانتقائي لأكاسيد الآزوت في غازات الاحتراق بدون حفاز (بعكس طريقة SCR) من انبعاث NO_x وذلك عن طريق التفاعل بين غازات الاحتراق ووسيط إنقاص الآزوت عند درجات الحرارة 800 حتى 1000 °C، ويستخدم عادة الأمونياك NH_3 كوسيط. يمكن أن تصل درجة سحب الآزوت بهذه الطريقة حتى $\eta_{DENOX} = 80\ \%$.

5.6 السحب المتزامن للكبريت والآزوت

يمكن تنظيف غازات الاحتراق بالسحب المتزامن (بنفس الوقت) لـــ NO_x وSO_2 في نفس المنشأة. وهناك طرائق رطبة وأخرى جافة لهذا الغرض.

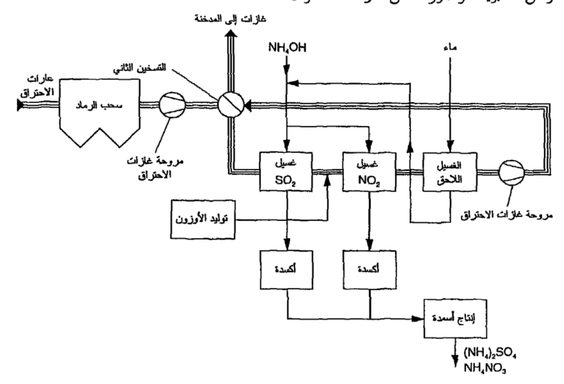
طريقة الفحم (الكربون) المُنشّط

في طريقة الامتزاز الجاف بالفحم المنشّط يؤكسَد في المرحلة الأولى SO_2 إلى حمض الكبريت H_2SO_4، وذلك عند درجة الحرارة 120 °C، ويتم ذلك بمساعدة الكربون المنشط. وفي المرحلة الثانية يضاف NH_3 وفحم مُنَشّط ومُجَدّد C وبذلك يُحَفّز NO_x ليتحول إلى N_2 وH_2O. يتم تخليص الفحم المنشط بشكل دوري من H_2SO_4 أي أنه يُجَدّد.

الطريقة الرطبة

يستخدم في الطريقة الرطبة NH_4OH. من SO_2 يتشكل في البداية $(NH_4)SO_3$ وNH_4HSO_3 التي تؤكسَد بعدئذ إلى NH_4NO_2 وNH_4NO_3. بمساعدة الآزوت تسحب في الغاسل الثاني أكاسيد الآزوت على شكل نيترات أو نيتريت الأمونيوم من غازات الاحتراق الخالية من SO_2، ثم يتم

بعدئذ التخلص من الآثار المتبقية من المواد المضافة. الشكل (12.6) يبين مخطط منشأة السحب المتزامن للكبريت والآزوت من غازات الاحتراق.



الشكل 12.6 : مخطط منشأة السحب المتزامن للكبريت والآزوت من غازات الاحتراق.

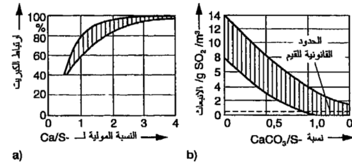
تقليل انبعاث SO_2 وNO_x في مولدات البخار ذات فرشة الوقود الدوامية

بإضافة الحجر الكلسي وجراء انخفاض درجة الحرارة في حجرة احتراق مولد البخار ذي فرشة الوقود الدوامية يتم التخلص من الكبريت بنسبة 97 % وينخفض تشكل NO بمعدل 50 %. تتعلق عملية سحب الكبريت بالنسبة Ca/S (الشكل 13.6). يتم إنشاء محطات الطاقة ذات فرشة الوقود الدوامية في ألمانيا واليابان وفرنسا والسويد وأمريكا (USA). وقد تم إنشاء أكبر محطة طاقة في العالم بمولد بخار ذي فرشة وقود دوارة باستطاعة كهربائية قدرها 250 MW وذلك في جنوب فرنسا (Provence) وبدأت بالعمل عام 1996.

طريقة شعاع الالكترونات

يجري تطوير هذه الطريقة في الوقت الحاضر، ويتم فيها تبريد غازات الاحتراق المنقاة من الغبار حتى درجة الحرارة 70 إلى 90 °C، ثم تُمرّر على NH_3، وبعدها تساق إلى مفاعل تحاط فيه الغازات

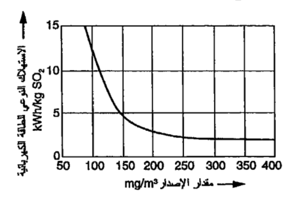
بشعاع من الإلكترونات المنطلقة من مُسرِّع (معجل) (accelerator) ذي نبضات. يقوم مولد شعاع (تيار) الالكترونات بإنتاج نبضات توترها (جهدها) الأعظمي 500 kV وتيار هالتها (كورونا) 36 mA، وبذلك يتم تفكيك جزئيات O2 وN_2 إلى ذرات. تتحول أكاسيد الآزوت والكبريت (NO_x و SO_x) أولاً مع ذرات الأوكسجين إلى حموض الكبريت والآزوت (H_2SO_4 و HNO_3) ثم تتحول مع NH_3 إلى NH_4NO_3 و $(NH4)_2SO_4$. وهذه تتم تصفيتها من غازات الاحتراق عن طريق مصافي نسيجية (ذات ألياف) وتحقق هذه الطريقة درجة عالية لسحب الآزوت والكبريت، وقد أمكن في منشأة تجريبية الوصول إلى سحب لـ NO_x قدره 85 % ولـ SO_x قدره 98 % من غازات الاحتراق.



الشكل 13.6 : درجة سحب الكبريت في فرشة الوقود الدوامية (a) ارتباط الكبريت بالنسبة المولية Ca/S (b) الانبعاث النوعي للكبريت وعلاقته بالنسبة $CaCO_3/S$.

الاستهلاك الذاتي للطاقة

يبين الشكل (14.6) الاستهلاك النوعي للكهرباء وعلاقته بمقدار انبعاث SO_2. على سبيل المثال، عند تخفيض تركيز SO_2 المسموح به في غازات الاحتراق من 200 mg/m^3 إلى 100 mg/m^3 يزداد الاستهلاك الذاتي النوعي للطاقة من 2.5 kWh/kg إلى 12.5 kWh/kg.



الشكل 14.6 : الاستهلاك النوعي للكهرباء وعلاقته بمقدار انبعاث SO_2.

7 محطات العنفات الغازية

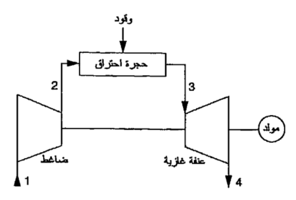
إنّ أهم اعتبارات هندسة الطاقة المتقدمة هي: المردود المرتفع وتوليد الكهرباء مع المحافظة على سلامة البيئة وتكاليف الطاقة المنخفضة. إن المحطات الحديثة التي تعمل على استخدام العنفات الغازية وبشكل خاص محطات الدارة المركبة التي تستخدم العنفات الغازية والبخارية معاً، والمبنية على أساس المردود العالي للعنفات الغازية. هذه المحطات تحقق الاعتبارات المذكورة أعلاه بأفضل ما يمكن، إذا ما قورنت بمحطات توليد الطاقة التقليدية. فمثلاً يصل مردود أفضل النماذج من العنفات الغازية إلى 40 %، وتبلغ تكاليف المنشأة 50 % من تكاليف منشأة بخارية مقابلة لها، ويبقى تأثيرها على البيئة منخفضاً جداً. ومع الدارة البخارية التالية الموصلة بها يصل المردود الإجمالي للدارة المركبة إلى ما يزيد عن 57 %.

ستُعالج في هذا الفصل النواحي الترموديناميكية، والبيئية المرتبطة بمحطة توليد الطاقة بالإضافة إلى الجوانب الفنية والاقتصادية لمحطات العنفات الغازية الحديثة. أما محطات الدارة المركبة فستعالج في الفصل الثامن.

1.7 دورة عمل جول

سنبدأ قبل كل شيء بالتحليل الترموديناميكي لمنشأة العنفة الغازية البسيطة. هناك نوعان من هذه المنشآت: المفتوحة والمغلقة. تتألف منشأة العنفة الغازية المفتوحة من العناصر التالية: ضاغط (Compressor)، حجرة احتراق، عنفة غازية مع مولد كهربائي كما هو مبين في الشكل (1.7). تبين دورة عمل جول الأسس الترموديناميكية لمنشأة ذات عنفة غازية، إذا أجريت هذه الدورة على غازٍ مثالي وبشكل عكوس. يقصد بمفهوم العكوسية عند إجراء الدورة أن تغيرات الحالة للغاز تتم بدون ضياعات داخلية للطاقة وبدون احتكاك، وبأن إضافة الحرارة أو طرحها يجري عند فروق

درجات حرارة صغيرة يمكن إهمالها، وباعتبار وسيط العمل المستخدم في الدورة غازاً كاملاً (مثالياً).



الشكل 1.7 : مخطط عمل منشأة ذات عنفة غازية مفتوحة.

يبين الشكل (2.7) دورة عمل جول في مخططي p-v و T-s. تكتمل دورة عمل جول من خلال تحولات الحالة العكوسة التالية:

ـــ 1 – 2 انضغاط ايزنتروبي للهواء في الضاغط.

ـــ 2 – 3 إضافة الحرارة في حجرة الاحتراق (الاحتراق) بثبوت الضغط.

ـــ 3 – 4 تمدد ايزنتروبي لوسيط العمل في العنفة الغازية .

ـــ 4 – 1 طرح للحرارة إلى الوسيط المحيط بثبوت الضغط.

من المهم في عملية التحليل الترموديناميكي لمحطة العنفة الغازية تحديد المردود الحراري لعملية تحول الحرارة إلى عمل. ومن أجل ذلك نحتاج كمية الحرارة المقدَّمة والعمل المفيد لدورة العمل. تتحدد هذه الكميات عن طريق معرفة درجات حرارة الغاز عند المواقع المختلفة. يجري التحليل الترموديناميكي بافتراض أن مواصفات وسيط العمل (غازات الاحتراق) مماثلة لمواصفات الغاز المثالي الذي هو الهواء. فمثلاً تحسب كميات الحرارة عن طريق السعة الحرارية الوسطية بثبوت الضغط c_p التي قيمتها 1.005 kJ/kg K.

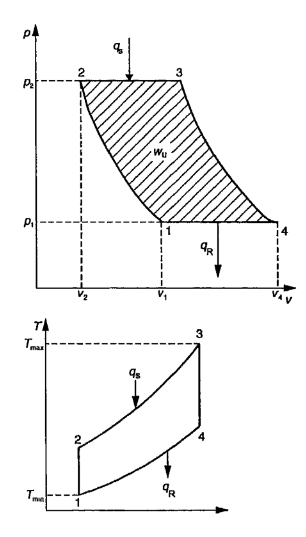
ترتبط المقادير المميزة لحالة الغاز أي الضغط p [Pa] ودرجة الحرارة T [K] والحجم النوعي v [m³/kg] من خلال معادلة الحالة التالية:

$$p\,v = R\,T \qquad (1.7)$$

حيث: R ثابت الغاز [J/kg K] (قيمته مثلاً للهواء 287 J/kg K).

وتتحقق من أجل الانضغاط أو التمدد الايزنتروبي العلاقات التالية:

$$T / p^{(k-1)/k} = \text{const} \;،\; T\,v^{k-1} = \text{const} \;\text{و}\; p\,v^{k} = \text{const} \qquad (2.7)$$



الشكل 2.7 : دورة عمل جول في المخططين p,v و T,s.

العلاقات التالية (3.7 حتى 8.7) تعطي كميات الحرارة النوعية بالنسبة لـ 1 kg من الغاز من أجل دورة عمل جول.

تحسب الحرارة النوعية المضافة [kJ/kg] من المعادلة:

$$q_s = c_P (T_3 - T_2) = h_3 - h_2 \quad (3.7)$$

أما الحرارة النوعية المطروحة [kJ/kg]:

$$q_R = c_P (T_4 - T_1) = h_4 - h_1 \quad (4.7)$$

العمل النوعي للتمدد في العنفة الغازية:

$$w_T = h_3 - h_4 = c_P (T_2 - T_1) \quad [kJ/kg] \quad (5.7)$$

والعمل النوعي للانضغاط في الضاغط:

$$w_{comp} = h_2 - h_1 = c_P (T_2 - T_1) \quad [kJ/kg] \qquad (6.7)$$

أما العمل المفيد لدورة عمل جول:

$$w_u = w_T - w_{comp} \quad [kJ/kg] \qquad (7.7)$$

وفقاً للقانون الأول في الترموديناميك فإن العمل النوعي المفيد مساوٍ للحرارة النوعية المفيدة:

$$w_u = q_u = q_s = c_P (T_3 - T_2) - (T_4 - T_1) \quad [kJ/kg] \qquad (8.7)$$

يُعَّرف المردود الحراري لدورة عمل بأنه نسبة العمل المفيد للدورة إلى الحرارة المضافة. ومن أجل دورة عمل جول:

$$\eta_{th} = w_u / q_s = 1 - q_R / q_5$$
$$= 1 - (T_4 - T_1) / (T_3 - T_2)$$
$$= 1 - T_1 (T_4 / T_1 - 1) / T_2 (T_3 / T_2 - 1) \qquad (9.7)$$

أهم المقادير المميزة لدورة عمل العنفة الغازية هو نسبة الضغط في الضاغط وفي العنفة الغازية:

$$\beta = p_2 / p_1 \qquad (10.7)$$

ترتبط درجات الحرارة عند النقاط المميزة لدورة عمل جول ببعضها البعض عن طريق نسبة الضغط كما يلي:

$$T_2 = T_1 . \beta^{(k-1)/k} \qquad (11.7)$$

$$T_4 = T_3 / \beta^{(k-1)/k} \qquad (12.7)$$

حيث: T_1 درجة الحرارة قبل الضاغط T_2 بعد الضاغط

T_3 درجة الحرارة قبل العنفة الغازية و T_4 بعد العنفة الغازية

k أس الايزنتروبي (قيمته 1.4 من أجل الهواء في الضاغط والعنفة الغازية).

من المعادلتين 11.7 و12.7 ينتج:

$$T_2 / T_1 = T_3 / T_4 = \beta^{(k-1)/k} \qquad (13.7)$$

و:

$$T_4 / T_1 = T_3 / T_2 \qquad (14.7)$$

إذا عوضنا المعادلة (15.7) في المعادلة (9.7) نحصل على المردود الحراري لدورة عمل جول:

$$\eta_{th} = 1 - T_1 / T_2 = 1 - 1 / \beta^{(k-1)/k} \quad (15.7)$$

تبين المعادلة (15.7) بأن المردود الحراري η_{th} لمنشأة عنفة غازية يزداد بارتفاع نسبة الضغط β.
تكون قيمة β بحدود الـ 15 في العنفات الغازية الحديثة ذات الاستطاعات العالية، والتي تتمتع بتبريد فعال لشفرات العنفة. و تصل قيمة β إلى 30 في أُحدث النماذج من العنفات الغازية GT 24 وGT 26 التي تنتجها شركة ABB. أما درجة حرارة الدخول الأعظمية المسموح بها للعنفة الغازية فهي ذات سقفٍ معين يحدده نوع المعدن المستخدم وتقانة التبريد، وتبلغ حالياً حوالي 1250 °C.

يُحسَب العمل النوعي المفيد لمنشأة عنفة غازية بدلالة كمية الحرارة المضافة والمردود الحراري للمنشأة كما يلي:

$$w_u = q_s \, \eta_{th} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (16.7)$$

سيتم في المثالين 1.7 و2.7 حساب النقاط المميزة وكميات الحرارة النوعية المضافة والمردود الحراري لدورة عمل جول.

مثال 1.7

عنفـــة غازيـــة تعمل وفـــق دورة عمل جول (انظر الشكلين 1.7 و2.7) وعند نسبة الضغط $\beta = p_2 / p_1 = 15$.

مواصفات الهواء قبل الضاغط هي: $p_1 = 1\text{bar}$ و$t_1 = 10\ °C$. درجة حرارة الدخول إلى العنفة $T_3 = 1100\ °C$.

الوسط العامل هو غاز مثالي: هواء ثابتُه $R = 0.287\ \text{kJ/kg K}$ وأس الايزونتروبي له $k = 1.4$.

يطلب تحديد مميزات وسيط العمل (الضغط p، درجة الحرارة T، الحجم النوعي v) عند النقاط المميزة للدورة.

الحل

1. الحجم النوعي للهواء قبل الضاغط يمكن حسابه من معادلة الحالة للغاز المثالي:

$$v_1 = R\,T_1 / p_1$$
$$= 0.287\ \text{kJ/kg K} \times 283 / 100\ \text{kPa}$$
$$= 0.812\ \text{m}^3/\text{kg}$$

2. درجة حرارة الهواء بعد الانضغاط الايزنتروبي:

$$T_2 = T_1\ \beta^{(k-1)/k}$$

$$= 283 \times 15^{(1.4-1)/1.4} = 613.5\ K$$

3. درجة حرارة الغاز بعد التمدد الايزنتروبي في العنفة:

$$T_4 = T_3\ /\ \beta^{(k-1)/k}$$

$$= 1373\ /\ 15^{0.2857} = 633.4\ K$$

وبطريقة مشابهة تنتج القيم المميزة عند كل النقاط المحددة لدورة العمل. الجدول (1.7) يعطي النتائج لكل نقطة.

الجدول 1.7: القيم المميزة لوسيط العمل عند النقاط المحددة لدورة عمل جول

[m³/kg] v	[K] T	[bar] p	النقطة
0.812	283	1	1
0.117	613.5	15	2
0.263	1373	15	3
1.818	633.4	1	4

مثال 2.7

من أجل المنشأة ذات العنفة الغازية الواردة في المثال 1.7 يطلب تحديد مايلي:

- عمل الانضغاط النوعي
- عمل التمدد النوعي
- العمل المفيد النوعي
- المردود الحراري

إذا تغيرت نسبة الضغط β بين 4 و30، فكيف يتغير المردود الحراري لدورة العمل؟

قيمة السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط لوسيط العمل الذي هو الهواء تبلغ 1.005 kJ/kg K.

الحل

1. وفقاً للجدول (1.7) فإن درجات الحرارة كالتالي ($\beta = 15$): قبل الانضغاط $T_1 = 283$ K، بعد الانضغاط $T_2 = 613.5$K، قبل التمدد $T_3 = 1373$K وبعد التمدد $T_4 = 633.4$ K.

2. العمل النوعي للانضغاط:

$$w_{comp} = c_P (T_2 - T_1)$$
$$= 1.005 \text{ kJ/kg } (613.5 - 283) \text{ K} = 332.2 \text{ kJ/kg}$$

العمل النوعي للتمدد:

$$w_T = c_P (T_3 - T_4)$$
$$= 1.005 \text{ kJ/kg } (1373 - 633.4) \text{ K} = 743.3 \text{ kJ/kg}$$

العمل النوعي المفيد:

$$w_u = w_T - w_{comp}$$
$$= 743.3 \text{ kJ/kg} - 332.2 \text{ kJ/kg} = 411.1 \text{ kJ/kg}$$

3. كمية الحرارة النوعية المضافة للدورة:

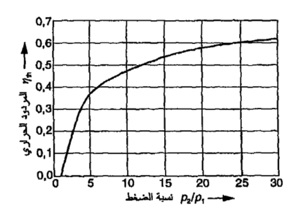
$$q_s = c_P (T_3 - T_2)$$
$$= 1.005 \text{ kJ/kg } (1373 - 613.5) \text{ K} = 763.3 \text{ kJ/kg}$$

4. المردود الحراري لدورة العمل:

$$\eta_{th} = w_u / q_s$$
$$= 411.1 \text{ kJ/kg} / 763.3 \text{ kJ/kg} = 0.538$$

5. قيمة المردود الحراري هذه أكبر بـــ 65 % = (0.538 – 0.327) / 0.237 من قيمة η_{th} التي تبلغ 0.237 عندما $\beta = 4$.

6. عندما تكون $\beta = 30$ فإن المردود الحراري يصبح 0.621 وهو أكبر من المردود الحالي الذي يبلغ 0.538 بمقدار 15.4 % = (0.621 – 0.538) / 0.538.



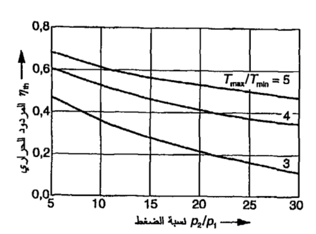
الشكل 3.7 : المردود الحراري لدورة عمل جول وعلاقته بنسبة الضغط p_2/p_1.

الجدول (2.7) والشكل (3.7) يبينان العلاقة بين المردود الحراري لدورة عمل جول η_{th} ونسبة الضغط $\beta = p_2 / p_1$.

الجدول 2.7: المردود الحراري η_{th} لدورة عمل جول وعلاقته بنسبة الضغط β.

نسبة الضغط	1	5	10	15	20	30	60
المردود الحراري η_{th}%	0	36.9	48.2	53.5	57.5	65.1	69

يتعلق المردود الحراري لدورة عمل جول بشكل كبير بنسبة درجة الحرارة الأعظمية إلى الأصغرية T_{max} / T_{min}، حيث T_{max} درجة حرارة الدخول إلى العنفة الغازية وT_{min} درجة حرارة الدخول إلى الضاغط. يبين الشكل (4.7) تخطيطياً تأثير نسبة درجة الحرارة الأعظمية إلى الأصغرية T_{max} / T_{min} ونسبة الضغط p_2/p_1 على المردود الحراري لدورة عمل جول.



الشكل 4.7 : المردود الحراري لدورة عمل جول η_{th} وعلاقته بنسبة الضغط p_2/p_1 ونسبة درجات الحرارة T_{max}/T_{min} (5,4,3).

2.7 الكفاءة (الفعالية)

تختلف دورة العمل لمنشأة عنفة غازية فعلية عن دورة عمل جول. تُراعى في المنشأة ذات العنفة الغازية ضياعات الطاقة الناتجة عن عمليتي الانضغاط والتمدد الفعليتين (غير العكوستين) في كلٍّ من الضاغط والعنفة، وكذلك ضياعات الضغط عند مدخل الضاغط وفي حجرة الاحتراق وعند مخرج العنفة الغازية.

يبين الشكل (5.7) اختلاف تغيرات الحالة الفعلية في الضاغط والعنفة الغازية عن التغيرات الايزونتروبية.

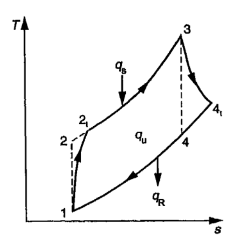
يكون عمل الانضغاط الفعلي أكبر وعمل التمدد الفعلي في العنفة أصغر والعمل المفيد لدورة العمل الحقيقية أصغر منه في دورة عمل جول وذلك بسبب عدم العكوسية.

تتم مراعاة هذه الاختلافات عن طريق المردود الداخلي للضاغط $\eta_{i,comp}$ وللعنفة الغازية η_{iT}، أي أن:

$$\eta_{i,comp} = w_{comp} / w_{comp,a} \quad (17.7)$$

$$\eta_{iT} = w_{T,a} / w_T \quad (18.7)$$

حيث: w_{comp} عمل الانضغاط النوعي الفعلي [kJ/kg] و$w_{comp,a}$ عمل الانضغاط النوعي النظري و $w_{T,a}$ عمل التمدد النوعي النظري [kJ/kg] و w_T عمل التمدد النوعي الفعلي.



الشكل 5.7 : الانضغاط والتمدد الفعليان في منشأة العنفة الغازية في المخطط T-s.

يمكن اعتماد القيم التالية للمردود الداخلي من أجل العنفات الغازية والضواغط الحديثة $\eta_{iT} = 0.9 - 0.92$ و$\eta_{i,comp} = 0.86 - 0.89$.

ينتج الانتالبي للهواء بعد انضغاط غير عكوس (فعلي) كما يلي:

$$h_{2,a} = h_1 + (h_2 - h_1) / \eta_{i,comp} \quad [kJ/kg] \quad (19.7)$$

وبطريقة مشابهة يمكن حساب الانتالبي للغاز بعد تمدد غير عكوس في العنفة:

$$h_{4,a} = h_3 - (h_3 - h_4) / \eta_{iT} \quad [kJ/kg] \quad (20.7)$$

وتنتج بالتالي درجة الحرارة الفعلية بعد الانضغاط أو التمدد كما يلي:

(21.7) $$T_{2,a} = T_1 + (T_2 - T_1) / \eta_{i,comp} \quad [K]$$

(22.7) $$T_{4,a} = T_3 - (T_3 - T_4)\, \eta_{i,comp} \quad [K]$$

يحسب عمل الانضغاط النوعي الفعلي بالنسبة لـ 1 kg وسيط عمل من العلاقة:

$$w_{comp,a} = w_{comp} / h_{i,comp} = (h_2 - h_1) / \eta_{i,comp}$$

(23.7) $$= h_{2a} - h_1 = c_P(T_{2a} - T_1) \quad [kJ/kg]$$

والعمل النوعي الفعلي للتمدد بالنسبة لـ 1 kg وسيط عمل:

(24.7) $$w_{Ta} = \eta_{iT} / w_T = \eta_{iT}(h_3 - h_4) = h_3 - h_{4a} = c_P(T_3 - T_{4a}) \quad [kJ/kg]$$

والعمل النوعي الفعلي المفيد بالنسبة لـ 1 kg وسيط عمل:

$$w_{u,a} = w_{T,a} / w_{comp,a} = (h_3 - h_{4a}) - (h_{2a} - h_1)$$

(25.7) $$= c_P [(T_3 - T_{4a}) - (T_{2a} - T_1)] \quad [kJ/kg]$$

والاستطاعة النظرية لمنشأة العنفة الغازية:

(26.7) $$P_{theor} = m\, (w_T - w_{comp}) \quad [KW]$$

وأخيراً فإن الاستطاعة الفعلية لمنشأة العنفة الغازية تحسب من العلاقة التالية:

(27.7) $$P = m\, w_{u,a} = m\, (w_{T,a} - w_{u,a}) = m\, (w_T\, \eta_{iT} - w_{comp} / \eta_{i,comp}) \quad [KW]$$

حيث: m التدفق الكتلي للغاز في العنفة الغازية [kg/s].

في المثال (3.7) تمت مراعاة تأثير عدم العكوسية في الضاغط والعنفة الغازية وكذلك تأثير ضياعات الطاقة على المردود الحراري لمحطة العنفة الغازية .

مثال 3.7

ما هو المردود الحراري لمحطة عنفة غازية نسبة الضغط فيها 15 ودرجة حرارة الدخول إلى الضاغط 10 °C ودرجة حرارة الدخول إلى العنفة الغازية 1100 °C، إذا كان المردود الداخلي للعنفة 0.92 وللضاغط 0.89؟

الحل

1. يؤخذ كل من درجة حرارة وسيط العمل بعد الانضغاط والتمدد الايزنتروبي وكميات الحرارة النظرية النوعية (عمل الانضغاط والتمدد، كمية الحرارة المضافة) وكذلك المردود الحراري لدورة عمل جول العكوسة من المثالين (1.7) و(2.7): $T_1 = 283$ K، $T_2 = 613.5$ K، $T_3 = 1373$K، $T_4 = 633.4$ K، $w_{comp} = 332.2$ kJ/kg، $q_s = 763.3$ kJ/kg، $\eta_{th} = 0.538$.

2. بمساعدة المردود الداخلي للعنفة $\eta_{iT} = 0.92$ وللضاغط $\eta_{i,comp} = 0.89$ يمكن حساب درجات الحرارة الفعلية لوسيط العمل بعد الانضغاط والتمدد كما يلي:

$$T_{2,a} = T_1 + (T_2 - T_1) / \eta_{i,comp}$$
$$= 283 + (613.5 - 283) / 0.89 = 645.3\text{K}$$

$$T_{4,a} = T_3 + (T_3 - T_4) / \eta_{iT}$$
$$= 1373 - (1373 - 633.4)\ 0.92 = 692.6\text{K}$$

3. يُحسب العمل النوعي الفعلي للانضغاط، والتمدد، والعمل النوعي المفيد كما يلي:

$$w_{comp,a} = w_{comp} / \eta_{i,comp}$$
$$= 332.2\ \text{kJ/kg} / 0.89 = 373.2\ \text{kJ/kg}$$

$$w_{T,a} = w_T\ \eta_{iT}$$
$$= 743.3\ \text{kJ/kg} \times 0.92 = 683.8\ \text{kJ/kg}$$

$$w_{u,a} = w_{T,a} - w_{comp,a}$$
$$= 683.8\ \text{kJ/kg} - 373.2\ \text{kJ/kg} = 310.6\ \text{kJ/kg}$$

4. الحرارة المضافة لكل 1 kg غاز في حجرة احتراق العنفة الغازية:

$$q_{s,a} = c_P\ (T_3 - T_{2,a})$$
$$= 1.005\ \text{kJ/kg}\ (1373 - 654.3)\text{K} = 772.3\ \text{kJ/kg}$$

5. المردود الحراري لدورة العمل الفعلية:

$$\eta_{th,a} = W_{u,a} / q_{s,a}$$
$$= 310.6\ \text{kJ/kg} / 722.3\ \text{kJ/kg} = 0.43$$

بالمقارنة مع $\eta_{th} = 0.538$ لدورة عمل جول العكوسة (انظر المثال 2.7) فإن المردود الحراري الفعلي $\eta_{th,a}$ أصغر بـــ: $(0.538 - 0.43) / 0.538 = 20\ \%$

3.7 رفع الاستطاعة الجاهزة

1.3.7 رفع نسبة الضغط ودرجة حرارة الدخول إلى العنفة الغازية

تتحدد قدرة منشأة ذات عنفة غازية على تقديم الاستطاعة عن طريق الاستطاعة القابلة للاستخدام (المفيدة) والمردود الحراري والاستهلاك النوعي للحرارة.

أما الاستطاعة الحرارية المفيدة p لمحطة عنفة غازية فتحدد عن طريق تدفق الغاز الذي يمر عبر العنفة الغازية والعمل النوعي المفيد للعنفة:

$$P = m\, W_u \quad [Kw] \tag{28.7}$$

يتألف التدفق الكتلي للغاز من التدفقات التالية: m_A تدفق الهواء، m_F تدفق الوقود، m_V تدفق البخار الذي يستخدم لتقليل انبعاث NO_x:

$$m = m_A + m_F + m_V \quad [kg/s] \tag{29.7}$$

يحسب التدفق الكتلي للوقود من الاستطاعة الحرارية Q_F [kW] التي تتحرر باحتراق الوقود في حجرة الاحتراق والقيمة الحرارية الدنيا للوقود LCV [kJ/kg]:

$$m_F = Q_F / LCV \quad [kJ/kWh] \tag{30.7}$$

سيتم حساب التدفق الكتلي للوقود m_F فيما يلي، وسيتضح أنه صغير بالمقارنة بالتدفق الكتلي للهواء m_A.

يُعرَّف الاستهلاك النوعي للحرارة في محطة العنفة الغازية q_{spec} بأنه نسبة الحرارة المضافة إلى العمل المفيد وواحدته [kg/kWh] حيث kWh هي الاستطاعة الكهربائية المُولَّدة:

$$q_{spec} = 3600\, Q_S / P = 3600 / \eta_{th} \quad [kJ/kWh] \tag{31.7}$$

برفع المردود الحراري يزداد العمل النوعي المفيد للعنفة الغازية، وبالتالي ينخفض الاستهلاك النوعي للحرارة في المنشأة.

لرفع المردود الحراري للمحطة ذات العنفة الغازية يجب رفع درجة الحرارة الوسطية لإضافة الحرارة T_S وتخفيض درجة الحرارة الوسطية لطرح الحرارة T_R.

يتم رفع المردود الحراري للمحطة ذات العنفة الغازية عن طريق:

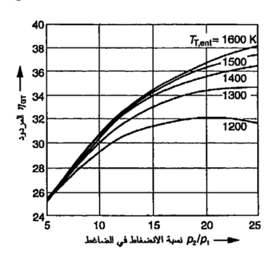
- رفع نسبة الضغط β.
- زيادة درجة الحرارة عند الدخول إلى العنفة الغازية.
- التسخين الأولي المتجدد للهواء قبل إرساله إلى حجرة الاحتراق عن طريق غازات الاحتراق.
- الانضغاط على مراحل مع تبريد وسطي والتمدد على مراحل مع التحميص الوسطي.

تم تحليل تأثير نسبة الضغط β في الفقرة السابقة، ويبين الجدول (2.7) والشكل (3.7) العلاقة بين المردود الحراري η_{th} ونسبة الضغط β من أجل دورة عمل جول المثالية. فمثلاً يزداد المردود الحراري لدورة عمل جول من 36.9 إلى 65.1 % عند رفع نسبة الضغط من 5 إلى 30، وتصل قيمة نسبة الضغط إلى 15 وحتى 30 في العنفات الغازية الحديثة ذات المردود العالي المستخدمة لتوليد التيار الكهربائي.

أما في العنفات المستعملة فعلياً فهناك حدود عليا لدرجة حرارة دخول الغاز إلى العنفة مرتبطة بمادة (معدن) شفرات العنفة الغازية وطريقة التبريد المُستخدمة. تبلغ درجة الحرارة عند الدخول إلى العنفة الغازية حالياً من أجل العنفة الغازية ذات المردود العالي للجيلين الثاني والثالث القيمة 1100 إلى 1250°C.

يتعلق مردود العنفة الغازية بالتدفق الكتلي للغاز ودرجة حرارته لدى دخوله إلى العنفة الغازية وبارتفاع موقع العنفة عن سطح البحر.

يؤدي رفع درجة حرارة الغاز لدى دخوله إلى العنفة الغازية إلى ارتفاع كبير في مردود العنفة، ويبين الشكل (6.7) تأثير درجة حرارة دخول الغاز إلى العنفة $T_{T,ent}$ على نسبة الضغط p_2/p_1 وعلى المردود الحراري η_{GT} لمحطة العنفة الغازية. هناك قيمة مثلى لنسبة الضغط (من أجل درجة حرارة معينة لدى دخول الغازات إلى العنفة) يتحقق عندها الوصول إلى العمل النوعي المفيد الأعظمي.



الشكل 6.7 : مردود محطة العنفة الغازية η_{GT} وعلاقته بنسبة الانضغاط p_2/p_1 وبدرجة حرارة الغاز لدى دخوله العنفة $T_{T,ent}$.

تؤثر درجات الحرارة امتصاص الهواء المرتفعة إلى الضاغط بشكل غير مناسب على مردود العنفة الغازية. ولذلك تكون استطاعة العنفة الغازية في الصيف أقل منّها في الشتاء. تحدد القيم القياسية عند شروط ISO [أي عند مستوى سطح البحر حيث الارتفاع = صفر، الضغط 1.013 bar درجة الحرارة 15 °C، الرطوبة النسبية للهواء 60 %].

تزداد كثافة الهواء عند درجات حارة أدنى وعند ضغط أعلى للهواء الخارجي مقارنة بالقيمة المقبولة عند شروط ISO القياسية. يزداد التدفق الكتلي للهواء عند انخفاض درجة الحرارة للهواء الخارجي، ولذلك فإن استطاعة العنفة الغازية في الشتاء أعلى منها في الصيف. كذلك تنخفض استطاعة نفس العنفة عند تركيبها في موقع أعلى.

من الإجراءات الأخرى لرفع مردود محطة العنفة الغازية هناك التسخين الأوّلي المتجدد للهواء والتبريد الوسطي والتحميص الوسطي لوسيط العمل، وسنتعرض لهذا في الفقرات القادمة.

2.37 التسخين الأولي المتجدد للهواء

> ! *تتعلق درجة الحرارة التي تغادر عندها الغازات العنفة بدرجة الحرارة لهذه الغازات لدى دخولها إلى العنفة وبنسبة الضغط.*

يعطي الجدول (3.7) درجات حرارة الغازات لدى مغادرتها للعنفة الغازية عند مختلف درجات الحرارة أثناء الدخول $T_{T,ent}$ وعند مختلف نسب الضغط β. القيم المختارة لـ $T_{T,ient}$ و β تمثل الجيلين الثاني والثالث من العنفات الغازية الحديثة.

الجدول 3.7: درجة حرارة الغازات لدى مغادرتها للعنفة الغازية [°C] وعلاقتها بدرجة حرارة دخول الغازات إلى العنفة ونسبة الضغط β المردود الداخلي للعنفة الغازية 0.9.

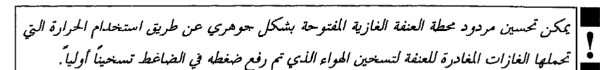
درجة حرارة دخول الغازات إلى العنفة [°C]	نسبة الضغط β 15	نسبة الضغط β 30
1000	423	330
1250	560	448
1500	696	566

كذلك يبين الجدول (3.7) بأن درجة حرارة الغازات المغادرة للعنفة

ـــ تزداد مع ارتفاع درجة حرارة الغازات لدى دخولها عند ثبات نسبة الضغط.

ـــ تتناقص مع ارتفاع نسبة الضغط عند ثبات درجة حرارة دخول الغازات.

في محطات العنفات الغازية التي تتراوح درجة حرارة دخول الغازات إلى العنفة فيها بين 1100 و1250 °C تكون درجة حرارة الغازات عند المغادرة بين 450 و620 °C تبعاً لنسبة الضغط. تكون الضياعات الحرارية مع غازات الاحتراق عند درجات الحرارة هذه عاليةً جداً ومن ثم يكون المردود منخفضاً.



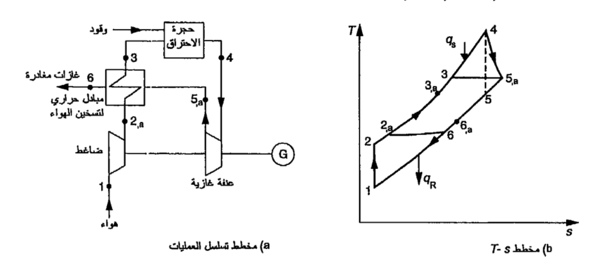
يمكن تحسين مردود محطة العنفة الغازية المفتوحة بشكل جوهري عن طريق استخدام الحرارة التي تحملها الغازات المغادرة للعنفة لتسخين الهواء الذي تم رفع ضغطه في الضاغط تسخيناً أولياً.

عن طريق التسخين الأولي المتجدد للهواء يتناقص الاستهلاك النوعي للوقود في حجرة احتراق العنفة الغازية، وتنخفض درجة حرارة غازات الاحتراق التي تطرد إلى الوسط الخارجي.

يبين الشكل (a7.7) بشكل تخطيطي محطة عنفة غازية مزودة بمبادل حراري لتسخين الهواء تسخيناً أولياً، ويبين الشكل (b7.7) دورة عمل هذه المنشأة على المخطط T-s.

من الممكن نظرياً الاستفادة من فرق درجات الحرارة المتاح في مسخن الهواء $(T_{5,a} - T_{2,a})$ بشكل كامل وبدون ضياعات من أجل تسخين الهواء بشكل متجدد تسخيناً أولياً.

في هذه الحالة يجري تسخين الهواء من $T_{2,a}$ إلى $T_{3,a} = T_{5,a}$ بشكل متجدد، وغازات الاحتراق تبرد عندئذ من $T_{5,a}$ إلى $T_{6,a} = T_{2,a}$.



الشكل 7.7 : المنشأة ذات العنفة الغازية والتسخين الأولي للهواء المتجدد.

من أجل منشأة ذات عنفة غازية وتسخين أولي للهواء ومتجدد وكامل تطبق العلاقات التالية:

a) كمية الحرارة النوعية المضافة أو المطروحة [kJ/kg]:

$$q_{s,reg} = c_p (T_4 - T_3) = c_p (T_4 - T_{5,a}) \quad (32.7)$$

$$q_{R,reg} = c_p (T_6 - T_1) = c_p (T_{2,a} - T_1) \quad (33.7)$$

b) العمل النوعي المفيد [kJ/kg]:

$$w_{u,reg} = w_T - w_{comp} = (T_4 - T_{5,a}) - (T_{2,a} - T_1)$$

$$= c_p (T_4 - T_{5,a}) - (T_{2,a} - T_1) \quad (34.7)$$

المردود الحراري للمنشأة ذات العنفة الغازية والتسخين الأولي الكامل المتجدد للهواء:

$$\eta_{th,rag} = w_{u,reg} / q_{s,reg} = [(T_4 - T_{5,a}) - (T_{2,a} - T_1)] / (T_4 - T_3) \quad (35.7)$$

في محطات العنفات الغازية ذات التسخين الأولي المتجدد للهواء تكون درجة حرارة الهواء الفعلية التي يمكن الوصول إليها $T_{3,a}$ أقل من T_3، وتكون درجة الحرارة الفعلية لخروج الغازات من العنفة $T_{6,a}$ أقل من T_6 (الشكل b7.7).

تتحدد قابلية انتقال الحرارة لمسخن هواء أولي حقيقي عن طريق عامل الفعالية ε الذي هو نسبة الاستطاعة الحرارية الفعلية للمبادل الحراري إلى النظرية، أي:

$$\varepsilon = (T_{3a} - T_{2,a}) / (T_{5,a} - T_{2,a}) \quad (36.7)$$

حيث: $(T_{3,a} - T_{2,a})$ الارتفاع الفعلي لدرجة الحرارة

$(T_{5,a} - T_{2,a})$ فرق درجات الحرارة المتوفر بين الغاز المغادر للعنفة والهواء في المبادل الحراري.

تتراوح قيمة ε عملياً بين 0.6 و0.8.

تبلغ الدرجة الفعلية للهواء أو لغازات الاحتراق عند مخرج المبادل الحراري:

$$T_{3,a} = T_{2,a} + \varepsilon (T_{5,a} - T_{2,a}) \quad (37.7)$$

أو

$$T_{6,a} = T_{5,a} + \varepsilon (T_{5,a} - T_{2,a}) \quad (38.7)$$

من أجل محطة عنفة غازية تحوي مبادلاً حرارياً فعلياً تطبق العلاقات التالية:

a) لحساب الحرارة النوعية المضافة أو المطروحة [kJ/kg]:

$$q_{s,reg} = c_p(T_4 - T_{3,a}) = c_p [T_4 - t_{2,a} - \varepsilon (T_{5,a} - T_{2,a})] \quad (39.7)$$

(40.7) $$q_{R,reg} = c_P (T_{6,a} - T_1)$$

b) لحساب العمل النوعي المفيد [kJ/kg]

(41.7) $$w_{u,reg} = c_P [(T_4 - T_{5,a}) - (T_{2,a} - T_1)]$$

كذلك فإن:

(42.7) $$w_{u,reg} = q_{s,reg,a} - q_{R,reg,a}$$

ويمكن الآن حساب المردود الحراري لمحطة العنفة الغازية عند إجراء التسخين الأولي للهواء كما يلي:

(43.7) $$\eta_{th,reg,a} = w_{u,reg,a} / q_{s,reg,a}$$

وتُحسب النسبة بين مردود محطة العنفة الغازية مع مبادل حراري لتسخين الهواء تسخيناً أولياً وبين مردودها بدون المبادل بشكل تقريبي كما يلي:

(44.7) $$\eta_{th,reg,a} / \eta_{th} = (T_4 - T_{2,a}) / (T_4 - T_{3,a})$$

سيتم في المثال 4.7 تحليل تأثير التسخين الأولي المتجدد للهواء على المردود الحراري للعنفة الغازية.

مثال 4.7

كيف يتغير المردود الحراري لعنفة غازية (المثال 3.7) إذا استخدمت حرارة غازات الاحتراق لتسخين الهواء تسخيناً أولياً متجدداً؟ عامل فعالية مسخن الهواء $\varepsilon = 0.75$. تعمل المنشأة عند نسبة ضغط 15، درجة حرارة دخول الهواء إلى الضاغط 10 °C والغازات إلى العنفة الغازية 1100 °C. المردود الداخلي للعنفة 0.92 وللضاغط 0.89.

الحل

1. تؤخـــذ من المثـــال 3.7 القيـــم التالية (انظر الشكل b7.7): $T_1 = 283$ K، $T_{2,a} = 654.3$ K، $T_4 = 1373$ K، $T_{5,a} = 692.6$ K، $w_{comp,a} = 373.2$ kJ/kg، $w_{T,a} = 683.8$ kJ/kg، $w_{u,a} = 310.6$ kJ/kg، $q_{s,a} = 722.3$ kJ/kg، $\eta_{th,a} = 0.43$.

2. درجة حرارة الغازات الفعلية بعد مسخن الهواء الأولي:

$$T_{3,a} = T_{2,a} + \varepsilon (T_{5,a} - T_{2,a})$$
$$= 654.3 + 0.75 (692.6 - 654.3) = 683 \text{ K}$$

ودرجة حرارة الهواء الفعلية بعد المسخن الأولي للهواء:

$$T_{6,a} = T_{5,a} + \varepsilon (T_{5,a} - T_{2,a})$$
$$= 692.6 + 0.75\ (692.6 - 654.3) = 663.9\ K$$

3. تحسب كمية الحرارة النوعية المضافة إلى المنشأة ذات العنفة الغازية أو المطروحة منها مع وجود تسخين أولي متجدد للهواء كما يلي:

$$q_{s,req,a} = c_P (T_4 - T_{3,a})$$
$$= 1.005\ kJ/kg\ (1373 - 683)\ K = 693.4\ kJ/kg$$

$$q_{R,req,a} = c_P (T_{6,a} - T_1)$$
$$= 1.005\ kJ/kg\ (663.9 - 283)\ K = 382.8\ kJ/kg$$

4. يبقى العمل النوعي المفيد للعنفة الغازية ثابتاً أي $w_{u,a} = 310.6$ kJ/kg، وبالتالي فالمردود الحراري للمنشأة مع تسخين أولي متجدد للهواء:

$$\eta_{th,reg} = w_{u,a} / q_{s,reg,a} = 310.6 / 693.4 = 0.448$$

5. بالمقارنة مع المردود المحسوب في المثال 3.7 حيث $\eta_{th,a} = 0.43$ فإن المردود $\eta_{th,rega}$ قد ارتفع بمقدار $(0.448 - 0.43) / 0.43 = 4.2\ \%$.

سيتم في المثال 5.7 تحليل تأثير درجة حرارة دخول الغازات إلى العنفة على المردود الحراري وعلى العمل النوعي المفيد لمحطة العنفة الغازية.

مثال 5.7

كم يبلغ المردود الحراري والعمل النوعي المفيد لمحطة عنفة غازية نسبة الضغط لها 15 درجة حرارة دخول الهواء إلى الضاغط 10 °C. المردود الداخلي للعنفة الغازية 0.92 وللضاغط 0.89؟ المنشأة بدون تسخين أولي متجدد للهواء ودرجة حرارة دخول الغاز إلى العنفة 950 °C و1250 °C حسب الحال. قارن النتائج بتلك الواردة في المثال 4.7.

الحل

1. من المثال 4.7 نجد:

$T_1 = 283$ K، $T_{2,a} = 654.3$ K، $w_{comp,a} = 373.2$ kJ/kg، $\beta = 15$، $\eta_{th,a} = 0.43$، $w_{u,a} = 373.2$ kJ/kg، من أجل $T_3 = 1100°C = 1373$ K.

2. من أجل درجة حرارة دخول إلى العنفة $T_3 = 950°C = 1223\ K$، $\beta = 15$، $\eta_{iT} = 0.92$. فإنه:

a) تحسب درجة حرارة الغاز بعد التمدد في العنفة كما يلي:

$$T_{4,a} = T_3 - (T_3 - T_4) = \eta_{iT}$$
$$= T_3\,[1 - (1 - 1/\beta^{(k-1)/k})\,\eta_{iT}]$$
$$= 1223\,[1 - (1 - 1/15^{0.2857})\,0.92] = 616.9\ K$$

b) يحسب عمل التمدد النوعي أو العمل النوعي المفيد لدورة العمل كما يلي:

$$w_{T,a} = c_P(T_3 - T_{4,a})$$
$$= 1.005\ kJ/kgK\ (1223 - 616.9)\ K = 609.1 kJ/kg$$

$$w_{u,a} = w_{T,a} - w_{comp,a}$$
$$= 609.1\ kJ/kg - 373.2\ kJ/kg = 235.9\ kJ/kg$$

c) كمية الحرارة النوعية المضافة:

$$q_{s,a} = c_p\,(T_3 - T_{2,a})$$
$$= 1.005\ kJ/kg\ (1223 - 654.3)\ K = 571.5\ kJ/kg$$

d) المردود الحراري:

$$\eta_{th,a} = w_{u,a}/q_{s,a}$$
$$= 235.9\ kJ/kg\ /\ 571.5\ kJ/kg = 0.413$$

3. عندما تكون درجة حرارة الدخول إلى العنفة الغازية $T_3 = 1250\ °C = 1523\ K$ تصبح القيم الجديدة كما يلي:

(a
$$T_{4,a} = T_3\,[1-(1 - 1/\beta^{(k-1)/k})\,\eta_{iT}]$$
$$= 1523\,[1 - (1 - 1/15^{0.2857})\,0.92] = 768.2\ K$$

(b
$$w_{T,a} = c_P\,(T_3 - T_{4,a})$$
$$= 1.005\ (1523 - 786.2) = 758.2\ K$$

$$w_{u,a} = w_{T,a} - w_{comp,a}$$
$$= 758.5 - 373.2 = 385.3\ kJ/kg$$

(c
$$q_{s,a} = c_P\,(T_3 - T_{2,a})$$
$$= 1.005\ (1523 - 654.3) = 873\ kJ/kg$$

(d

$$\eta_{th,a} = w_{u,a} / q_{s,a}$$
$$= 385.3 / 873 = 0.441$$

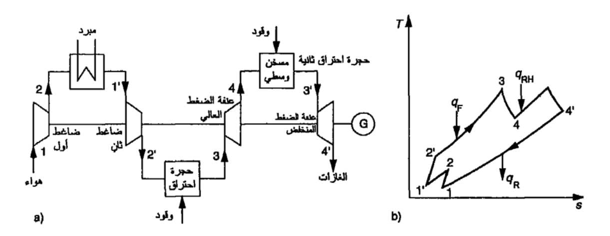
تم ترتيب النتائج في الجدول 4.7.

الجدول 4.7: تأثير درجة حرارة الدخول إلى العنفة الغازية على المردود الحراري η_{th} والعمل النوعي المفيد w_u لمحطة العنفة الغازية. القيم المرجعية هي: $T_1 = 283°C$، $\beta = 15$، $T_3 = 1100°C$، $\eta_{th,a} = 0.43$، $w_{u,\beta} = 310.6$ kJ/kg

درجة حرارة الدخول إلى العنفة الغازية [°C]	η_{th}	$\Delta\eta_{th}/\eta_{th,\beta}$ [%]	w_u [kJ/kg]	$\Delta w_u/w_{u,\beta}$ [%]
950	0.413	– 4	235.9	–24
1100	0.430	–	310.6	–

3.3.7 التبريد الوسطي والتسخين الوسطي

يمكن رفع درجة الحرارة الوسطية لإضافة الحرارة وتخفيض درجة الحرارة الوسطية لطرح الحرارة عن طريق الانضغاط على مراحل مع التبريد الوسطي والتمدد على مراحل في العنفة الغازية مع التسخين الوسطي. وبذلك تزداد الاستطاعة المقدمة من العنفة وكذلك المردود الحراري للمنشأة.



الشكل 8.7 : منشأة ذات عنفة غازيـــة يحدث فيها الانضغاط على مرحلتين a) مخطط تسلسل الأجـــزاء b) مخطط T-s.

يبين الشكل (8.7) مخطط دورة عمل عنفة غازية ذات انضغاط على مرحلتين وتبريد وسطي للهواء وكذلك ذات تمدد على مرحلتين مع التسخين الوسطي.

من أجل هذه المنشأة التي يكون فيها الانضغاط والتمدد عند نفس التغيرات لدرجة الحرارة في كل مرحلة تطبق العلاقات التالية:

a) العمل النوعي المفيد لكل kg من الوسيط العامل:

$$w_{u,a} = (w_{T1} + w_{T2}) - (w_{comp1} + w_{comp2})$$

$$= 2c_P\,[(T_3 - T_4)\,\eta_{iT} - (T_2 - T_1)\,/\,\eta_{i,comp}]\quad [kJ/kg] \tag{45.7}$$

b) كمية الحرارة النوعية المضافة في حجرة الاحتراق الأولى (دليلها C.C) وفي عملية التسخين الوسطي في حجرة الاحتراق الثانية (دليلها RH):

$$q_s = q_{cc} + q_{RH} = c_P\,[(T_3 - T_{2'}) + (T_{3'} - T_4)]\quad [kJ/kg] \tag{46.7}$$

c) كمية الحرارة النوعية المطروحة:

$$q_R = c_P\,(T_{4'} - T_1)\quad [kJ/kg] \tag{47.7}$$

d) المردود الحراري لمحطة العنفة الغازية:

$$\eta_{th} = w_{u,a}\,/\,q_s \tag{48.7}$$

الحرارة المطروحة من مبرد الهواء:

$$q_C = c_P\,(T_2 - T_{1'})\quad [kJ/kg] \tag{49.7}$$

تحسب درجتا الحرارة الفعليتان T_2 وT_4 عن طريق المعادليتين 21.7 و22.7.

وتحسب الاستطاعة الحرارية المفيدة المكتسبة من محطة العنفة الغازية كما يلي:

$$P = m\,w_{u,a}\quad [kW] \tag{50.7}$$

حيث: m التدفق الكتلي لوسيط العمل في الضاغط والعنفة الغازية [kg/s].

في الحالة العامة ومن أجل n_{comp} مرحلة للانضغاط مع التبريد الوسطي ومن أجل n_T مرحلة للتمدد مع التسخين الوسطي فإن كميات الحرارة النوعية [kJ/kg] والمردود الحراري تحسب كما يلي:

$$w_{u,a} = n_T\,w_{T,a} - n_{comp}\,w_{comp,a}$$

$$= c_P\,[n_T\,(T_3 - T_{4s})\,\eta_{iT} - n_{comp}\,(T_{2s} - T_1)\,/\,\eta_{icomp} \tag{51.7}$$

$$q_s = c_P\,[(T_3 - T_{2'}) + (n_T - 1)\,(T_{3'} - T_{4'})] \tag{52.7}$$

$$q_R = c_P\,(T_{4'} - T_1) \tag{53.7}$$

(54.7) $$q_C = c_p\,(T_2 - T_{1'})\,(\eta_{comp} - 1)$$

(55.7) $$\eta_{th} = w_{u,a} / q_s$$

حيث: T_{2S} وT_{4S} درجتا الحرارة بعد الانضغاط الايزنتروبي أو التمدد الايزنتروبي ($s = cont$)

$T_{2'}$، $T_{3'}$، $T_{4'}$ درجات الحرارة بعد الانضغاط الثاني، وقبل العنفة الثانية T_2 وبعدها.

إذا بلغ عدد المراحل اللانهاية و$\eta_{i,comp} = \eta_{iT} = 1$ نحصل على مردود دورة عمل كلر (Ackeret - Keller) المؤلفة من عمليتين بثبوت درجة الحرارة وعمليتين بثبوت الضغط. حيث يجري تبريد وسيط العمل بين مراحل الانضغاط بثبوت الضغط إلى درجة الحرارة الابتدائية، وكذلك يجري تسخينه بعد كل مرحلة تمدد ثانية إلى درجة حرارة الدورة الأعظمية وذلك بثبوت الضغط. المردود الحراري لدورة العمل هذه مساوٍ للمردود الحراري لدورة عمل كارنو ذات درجة الحرارة الأعظمية T_3 ودرجة الحرارة الصغرى T_1:

(56.7) $$\eta_{th} = 1 - T_1 / T_3$$

جرّاء التكاليف العالية للأجزاء الإضافية فإنه في الوقت الحاضر لا يوجد عملياً إلا تبريد وسطي وحيد وتسخين وسطي وحيد.

يبين المثال 6.7 حساب الاستطاعة الكهربائية والاستهلاك النوعي للوقود لعنفة غازية.

مثال 6.7

محطة عنفة غازية لها المواصفات التالية: نسبة الضغط 15، درجة حرارة دخول الهواء إلى الضاغط 10 °C وإلى العنفة الغازية 1100 °C. المردود الداخلي للعنفة 0.92 وللضاغط 0.89، التدفق الكتلي للهواء 610 kg/s. يطلب تحديد ما يلي: استهلاك الغاز الطبيعي في حجرة احتراق العنفة الغازية والاستطاعة الكهربائية. القيمة الحرارية الدنيا للغاز الطبيعي LCV = 46780 kJ/kg، مردود المولدة الكهربائية 0.98.

الحل

1. من المثال 3.7 نحصل على القيم التالية: $\beta = 15$، $T_1 = 283$ K، $T_{2,a} = 654.3$ K، $T_3 = 1373$ K، $T_{4,a} = 692.6$ K، $w_{comp,a} = 373.2$ kJ/kg، $w_{T,a} = 683.8$ kJ/kg، $w_{u,a} = 310.6$ kJ/kg، $q_{s,a} =$ 722.3 kJ/kg، $\eta_{th,a} = 0.43$.
2. تحسب استطاعة التشغيل الفعلية اللازمة للضاغط بدلالة التدفق الكتلي للهواء $m_A = 610$ kJ/s:

$$P_{comp} = m_A\, w_{comp,a}$$
$$= 610\ kg/s \times 373.2\ kJ/kg = 227652\ kW$$

3. الاستهلاك النوعي للوقود في حجرة احتراق العنفة الغازية:

$$m_F = m_A\, q_{s,a} / LCV$$
$$= 610\ kg/s \times 722.3\ kJ/kg / 46780\ kJ/kg = 9.42\ kg/s$$

4. تدفق الغازات المغادرة للعنفة:

$$m_G = m_A + m_F$$
$$= 610\ kg/s + 9.42\ kg/s = 619.42\ kg/s$$

5. الاستطاعة الفعلية للعنفة الغازية:

$$P_T = m_G\, W_{T,a}$$
$$= 619.42\ kg/s \times 683.8\ kJ/kg = 423559\ kW$$

6. الاستطاعة الكهربائية للمنشأة

$$P_{el} = \eta_G\,(P_T - P_{comp})$$
$$= 0.98\,(423559 - 227652) = 191989\ kW$$

4.7 أجزاء المحطة

1.4.7 مجموعة العنفة (العنفة الغازية + المولدة الكهربائية)

تستخدم العنفات الغازية الثابتة لتشغيل المولدات الكهربائية في محطات توليد الطاقة، ويتصل في مجموعة العنفة كل من العنفة والمولد والضاغط التوربيني. تحتاج محطات العنفات الغازية مقارنة بالآلات الحرارية الأخرى إلى أقل قدرٍ من المساحة وحجم البناء والكتلة للمعدات، وتبلغ تكاليف المعدات للمنشأة ذات العنفة الغازية 50 حتى 60 % فقط من تكاليف معدات المنشأة ذات العنفة البخارية.

تُحدَّد استطاعة العنفة عن طريق التدفق الكتلي وهبوط الإنتالبي لوسيط العمل (الهواء) مع مراعاة الضياعات الداخلية. تعطى استطاعة ومردود العنفة عند الشروط المحيطية وفقاً لمعايير الـــ ISO أي عند مستوى البحر (الارتفاع صفر عن مستوى سطح البحر) والضغط $p = 1.013$ bar

ودرجة الحرارة $t = 15$ °C. من أجل التصحيح عند الارتفاع عن مستوى البحر يُعتبَر بأن الاستطاعة تنخفض بمعدل 1.12 % لكل 100 m ارتفاع بسبب انخفاض الكتلة النوعية للهواء. كذلك يلزم تصحيح آخر بسبب ضياع الضغط.

يبلغ ضياع الاستطاعة 1.2 إلى 2.5 % لكل 1 kPa ضياع في الضغط في قناة امتصاص الضاغط و 0.5 إلى 1.5 % لكل 1 kPa ضياع في الضغط في مجرى تصريف الغازات من العنفة الغازية.

يتحدد مردود محطة العنفة الغازية عن طريق نسبة الضغط β ودرجة حرارة دخول الغازات إلى العنفة الغازية. تستخدم في محطات توليد الطاقة على الأغلب عنفات غازية ذات محور وحيد تعمل عند قيمة لـــ β تتراوح بين 10 و16 مع انضغاط أحادي المرحلة. تبلغ أكبر استطاعة للعنفات التي تتولد فيها الكهرباء بتردد 50 هرتز في الوقت الحاضر 240 MW (عند شروط الـــ ISO) من أجل تدفق كتلي للهواء قدره 640 kg/s وعند درجة حرارة دخول إلى العنفة تبلغ حوالي 1230 °C. للتردد 60 هرتز ينتج 170 MW و454 kg/s.

من أجل تصميم أمثل تعمل العنفة عند سرعات عالية إذا كانت الاستطاعة الكهربائية أقل من 70 MW. تربط العنفة عادة بالمولدة الكهربائية عن طريق علبة سرعة.

تصمم شفرات العنفة من أجل عمر قدره 50000 حتى 100000 ساعة عمل.

تبلغ استطاعة عنفات سيمنس من السلسلة الجديدة 70 حتى 240 MW.

ويبين الجدول (5.7) المعطيات الفنية لعنفات سيمنس V84.2، V94.2، V64.3A، V84.3A، V94.3A.

الجدول 5.7: المعطيات الفنية لعنفات سيمنس الغازية، السلسلة 2 و 3A الوقود: غاز طبيعي شروط ISO القياسية هي 15 °C و1013 mbar، عند مستوى سطح البحر.

نموذج العنفة الغازية	V84.2	V94.2	V64.3A	V84.3A	V94.3A
الاستطاعة الكهربائية [MW]	109	159	70	170	240
التردد [Hz]	60	50	50/60	60	50
المردود [%]	34.0	34.5	36.8	38.0	38.0
نسبة الضغط	11.0	11.1	16	16	16
تدفق الغازات الكتلي [kg/s]	360	519	194	454	460
درجة حرارة مغادرة العنفة[°C]	544	540	565	562	562
إصدار NO_x [ppm]*	25	25	< 25	< 25	< 25

* المقصود بـــ ppm جزء بالمليون (parts per million)

أما الجدول (6.7) فيتضمن مواصفات الأداء لمجموعة العنفة GT 26 من شركة ABB لمحطة الطاقة AG.

الجدول 6.7: مواصفات مجموعة العنفة GT 26 (عند شروط ISO) من صنع شركة ABB لمحطات الطاقة AG. الوقود المستخدم: غاز طبيعي. الشروط القياسية ISO هي 15 °C و1013 mbar وعند مستوى سطح البحر.

الوصف	الواحدة	القيمة
الاستطاعة	MW	240
المردود (الكفاءة)	%	37.8
نسبة الضغط	-	30
التدفق الكتلي	kg/s	542
درجة حرارة الغاز	°C	610
عدد المراحل		
ـــ العنفة	-	5
ـــ الضاغط	-	22
العدد		
ـــ حجرة الاحتراق (قليلة الإصدار للغازات الضارة)	-	2
ـــ حرّاق لكل حجرة احتراق	-	30/24
انبعاث NO_x (عند محتوى 15% أوكسجين في الغازات)	*ppm	< 25
* parts per million – ppm (جزء من المليون)		

لقد تضمنت عنفات الاستطاعات التالية GT 26 من شركة ABB وV94.3A من شركة Siemens /KWU أحدث التطورات في هندسة العنفات الغازية، وهي بذلك تحقق أعلى مردود مع ضمان إصدار قليل لـــ NO_x عند إحراق الغاز الطبيعي والوقود السائل الثقيل (فيول أويل).

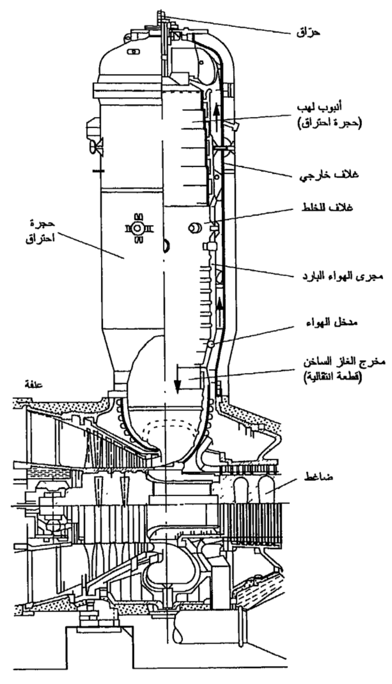
تتميز العنفة الغازية GT 26 باحتراق ثنائي المراحل في حجرتي احتراق قليل الإصدار للغازات الضارة.

يُعرف مردود مجموعة العنفة (العنفة الغازية مع المولد الكهربائي) بأنه نسبة استطاعة المولدة الكهربائية إلى الاستطاعة الحرارية الداخلة (المقدمة).

2.4.7 حجرة الاحتراق والحراق اللذان يصدران قدراً ضئيلاً من الغازات الضارة

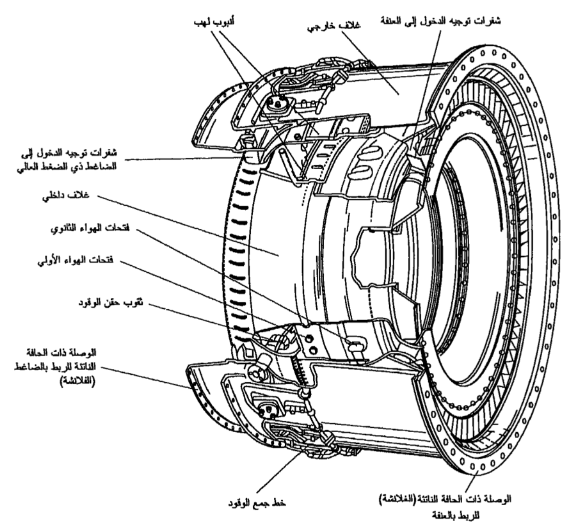
استخدمت قديماً حجرة الاحتراق المفردة أو التي تأخذ شكل صومعة (Silo) في محطات توليد الطاقة ذات العنفة الغازية، و(الشكل 9.7) ولكن في الأونة الأخيرة استخدمت حجر الاحتراق التي

لها شكل حلقي في محطات توليد الطاقة، والتي كان قد جرى تطويرها أصلاً من أجل محركات الطائرات النفاثة. وهي حجر احتراق تمتاز بقلة إصدارها للغازات الضارة وبتعدد الحراقات المركبة عليها والمتجمعة بين الضاغط والعنفة.



الشكل 9.7 : حجر احتراق وحيدة (المصدر شركة ABB).

يبين الشكل (10.7) حجرة احتراق لعنفة غازية حلقية الشكل.

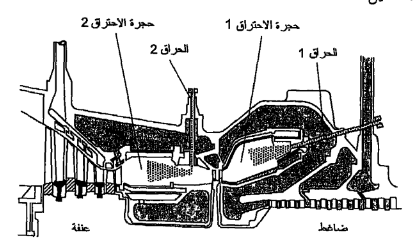


الشكل 10.7 : حجرة الاحتراق الحلقية مع احتراق على مرحلتين.

يتراوح تحميل حجرة الاحتراق بين 40 (من أجل حجرة احتراق واحدة) و800 MW/m^3 (حجر الاحتراق الحلقية الشكل). يتم تبريد جدار حجرة الاحتراق المصنوعة من خليطة Ni (النيِكل) وCO (الكوبالت) بالحمل والتبريد الغشائي (film).

تساعد درجات الحرارة العالية السائدة في حجرة الاحتراق (حوالي 1500 °C) على تشكيل NO_x في حجرة الاحتراق. ولتقليل انبعاث NO_x تستخدم حراقات ذات إصدار قليل للغازات الضارة. هناك نوعان من الحراقات: الأول انتشاري (diffusion Burner) والثاني ذو خلط أولي (Pemixing B). في النوع الأول لا يختلط الوقود مع الهواء إلاّ في حجرة الاحتراق. نشير هنا أن استخدام النوع الثاني من الحراقات (أي ذات الخلط الأولي) يُستخدم لتقليل انبعاث NO_x. تنخفض في هذه الحالة درجة الحرارة في حجرة الاحتراق وبالتالي يتناقص تشكل NO، ويتم تحقيق ذلك عن

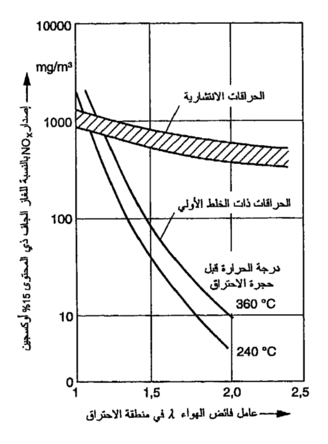
طريق الاختيار الأمثل لنسبة الهواء إلى الوقود في احتراق ثنائي المراحل في حجرة الاحتراق (الشكل 11.7). يتم الاحتراق في هذه الحالة من أجل عامل فائض هواء $\lambda = 0.6$ في المرحلة الأولى و $\lambda = 2$ في المرحلة الثانية للاحتراق. كذلك يمكن تخفيض انبعاث NO_x عن طريق تشغيل الحراقات وإيقافها عن العمل أثناء تشغيل العنفة.



الشكل 11.7 : حجرة الاحتراق الحلقية مع احتراق على مرحلتين.

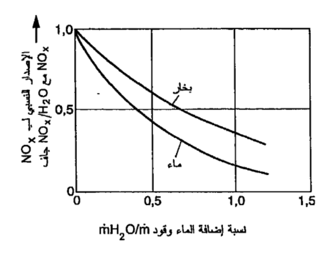
تستخدم في الوقت الحاضر الطريقة الرطبة التي تتضمن إضافة الماء والبخار إلى الحراق بقصد تخفيض انبعاث NO_x. مساوئ هذه الطريقة هي الاستهلاك الكبير للماء الخالي من الأملاح وتخفيضها للمردود. يبلغ الاستهلاك الساعي للماء من أجل منشأة استطاعتها 100 MW حوالي 25 m^3. يتأثر المردود بنسبة الماء إلى الوقود f، ومن أجل $f = 1$ ينخفض المردود حوالي 5 %.

تقدم طرق الإحراق المبتدعة لتقليل انبعاث الغازات الضارة على استخدام الحراقات ذات الخلط الأولي، وعندها لا يُضاف أية كميات من الماء أو البخار إلى الحرّاق. عند عمل العنفة الغازية بالحمولة الكاملة تُمكّن الحراقات ذات الخلط الأولي من الوصول إلى احتراق كامل للغاز الطبيعي لزيت الوقود السائل الخفيف (المازوت) gasoil مع انبعاث قليل جداً لـــ NO_x. عند بدء التشغيل وعندما تكون حمولة العنفة صغيرة (حتى 40 % من الحمولة الكاملة) فإن الحراقات ذات الخلط الأولي السائدة حالياً لا تستطيع تأمين احتراق مستقر، ولذلك تستخدم في هذه الحالة الحراقات الانتشارية مع إضافة للماء. يبين الشكل (12.7) انبعاث NO_x من أجل غاز جاف محتواه من الأوكسجين 15 % وعلاقة ذلك بعامل فائض الهواء λ لكلٍ من الحراقات الانتشارية والحراقات ذات الخلط الأولي.



الشكل 12.7 : إصدار NO_x بالنسبة للغاز الجاف ذي المحتوى 15% أوكسجين وارتباطه بعامل زيادة الهواء λ للحراقات الانتشارية وذات الخلط الأولي.

كما يبين الشكل (13.7) تأثير إضافة الماء أو البخار إلى حجرة الاحتراق على انبعاث NO_x.



الشكل 13.7 : تأثير إضافة الماء أو بخار الماء إلى حجر الاحتراق على انبعاث NO_x.

5.7 مقارنة بين محطات الطاقة ذات العنفات الغازية والمحطات البخارية

لمحطات الطاقة ذات العنفات الغازية مقارنة بالمحطات البخارية المزايا التالية:

ـــ قابلية كبيرة لرفع درجة الاستفادة من طاقة الوقود وذلك بإمكانية وصلها مع دورة بخار لتشكيل دارة مركبة (درجة الاستفادة الإجمالية تصل إلى 58 %).

ـــ زمن إنشاء المحطة قصير.

ـــ التكاليف المنخفضة للمعدات (50 إلى 65 % من تكاليف محطة طاقة بخارية).

ـــ قصر زمن الإقلاع (من 5 إلى 15 ـــ 20 دقيقة بحسب الحمولة).

ـــ صِغَر المكـــان اللازم (10 إلى 20 m^2 لكل MW، بينما تحتاج المحطة البخارية 50 حتى 80 m^3/MW).

ـــ عدم الحاجة إلى مياه تبريد.

ـــ الاستهلاك الذاتي الضئيل للطاقة (أقل من 1 % من الاستطاعة الاسمية).

من المساوئ المحتملة للمحطات ذات العنفات الغازية بالمقارنة مع المحطات البخارية انخفاض المردود وارتفاع إطلاق NO_x. لقد كان ذلك صحيحاً حتى قبل عدة أعوام. جرّاء انخفاض درجة دخول الغازات إلى العنفة الغازية وصِغَر نسبة الضغط فقد كان مردود العنفة الغازية بين 25 و 30 %. أما انبعاث NO_x فقد كان مرتفعاً بسبب ارتفاع درجة حرارة حجرة الاحتراق. لكن التطور الهائل في هندسة العنفات الغازية خلال الفترة القصيرة الفائتة أدى إلى رفع مردود العنفة الغازية بشكل كبير، حيث تجاوز 38.5 % تبعاً لمعلومات المصنعين. لقد أمكن باستخدام مفاهيم حجرات الاحتراق المحافِظة على البيئة والتصاميم المبتكرة للحراقات تخفيض إطلاق NO_x بشكل كبير (عند إحراق الغاز الطبيعي في حالات مناسبة انخفض إصدار NO_x إلى ما دون 10 ppm)، ولذلك فإن عيوب (مساوئ) العنفات الغازية في الوقت الحاضر مقارنة بحسناتها هي:

ـــ محدودية مرونتها عند اختيار الوقود المناسب [تستخدم في حجر احتراق العنفات الغازية الأنواع الجيدة ذات القيمة العالية من الوقود الغازي والوقود السائل الخفيف [المازوت (gasoil)].

ـــ قِصَر عُمر شفرات العنفة الغازية.

ـــ ضرورة تخميد الصوت.

وفقاً لمعايير عام 1997 فإن أعلى مردود لعنفة ذات استطاعة عالية في محطات الطاقة يمكن أن يصل إلى 39.5 %.

استخدمت العنفات الغازية في الماضي في محطات الطاقة من اجل تغطية الذروة بسبب قصر الزمن اللازم لإقلاعها، أما الآن فتستخدم لتغطية الحمولة الأساسية.

يُستفاد في محطة الدارة المركبة (بخارية وغازية) من مزايا كلا العمليتين لرفع مردود عملية تحويل الطاقة. شرط الحصول على مردود إجمالي مرتفع في محطة دارة مركبة هو استخدام عنفة غازية ذات مردود عالٍ. وسنعرض هذا في الفصل الثامن.

8 محطات الدارة المركبة*

1.8 المحطة المركبة بدون إحراق وقود إضافي لتوليد البخار

تركيب وأنواع محطات الدارة المركبة

في محطة الدارة المركبة تُربَط عنفة غازية تقوم بعملية أولى على التسلسل مع عنفة بخارية تقوم بدورها بعملية ثانية

ترتبط العمليتان بالشكل الأمثل، وبحيث يتحقق الاستغلال الأمثل لطاقة الوقود.

تستخدم في هذه المنشأة الحرارة المضافة عند درجة الحرارة العالية في العنفة الغارية أولاً وبمردود عالٍ لتوليد الكهرباء، ثم تُستَغَل حرارة الغازات المغادرة للعنفة الغازية في عملية بخار تالية لتوليد الكهرباء أيضاً.

هناك نوعان أساسيان لهذه المنشآت:

— محطة الدارة المركبة بدون إحراق وقود إضافي لتوليد البخار.

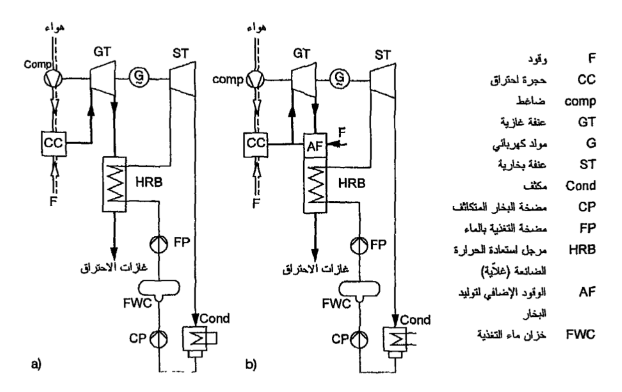
— محطة الدارة المركبة مع إحراق وقود إضافي لتوليد البخار.

تتألف المنشأة في النوع الأول من دورة عمل لعنفة غازية يليها دورة عمل لعنفة بخارية. يبين الشكل (1.8) الأجزاء التي تتألف منها النوعان المذكوران أعلاه.

في النوع الأول يُحرق الوقود في حجرة احتراق العنفة الغارية فقط، ويتم تحويل الحرارة إلى عمل في العنفة الغازية والعنفة البخارية. يُولّد البخار في مرجل (غلاية) استعادة (استرجاع) الحرارة الضائعة (heat recovery boiler) باستخدام الحرارة الضائعة المرتبطة مع غازات الاحتراق المغادرة للعنفة الغازية. أما البخار المغادر للعنفة البخارية فيجري تكثيفه وضخه عن طريق مضخة خاصة، ثم يرسل إلى خزان ماء التغذية حيث يُسحب منه الهواء. ليس هناك تسخين أولي لماء التغذية إلا في

* Combined Cycle Power Plants — المترجم

خزان ماء التغذية، وهذا يساعد على زيادة تبريد غازات الاحتراق في مرجل استعادة الحرارة الضائعة. درجة الحرارة للدنيا المسموح بها لغازات الاحتراق هي درجة حرارة التكاثف (الندى) لهذه الغازات، وهي تتعلق بالضغوط الجزئية لبخار الماء وثاني أوكسيد الكبريت في غازات الاحتراق، أي أنه لا يجوز أن تنخفض درجة حرارة ماء التغذية إلى ما دون درجة حرارة التكاثف، وكلما ازداد محتوى الوقود من الكبريت كلما توجب رفع درجة حرارة ماء تغذية المرجل.

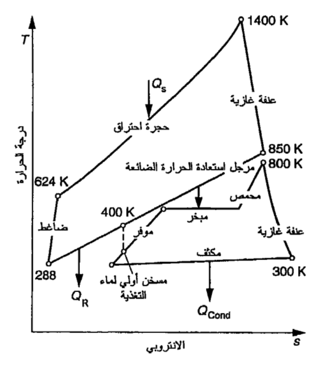


الشكل 1.8 : مبدأ عمل المحطات المركبة: (a) بدون إحراق وقود إضافي لتوليد البخار و(b) مع إحراق وقود إضافي توليد البخار.

يبين الشكل (2.8) دورة عمل محطة الدارة المركبة وذلك على المخطط T-s. تتألف دروة العمل الإجمالية من عملية العنفة الغازية وعملية المنشأة البخارية الموصولة بعدها.

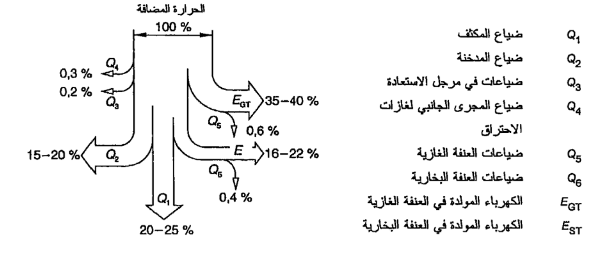
وسنقدم في الوصف التالي توضيحاً لطريقة عمل محطة الدارة المركبة. يُضغَط الهواء ادياباتياً (بشكل كظيم) في الضاغط، ثم يُحرق الوقود بواسطة الهواء المضغوط وذلك في حجرة احتراق العنفة الغازية عند ضغط ثابت، وبعدها تتمدد الغازات الناتجة عن الاحتراق في العنفة الغازية بشكل كظيم. بعد مغادرتها للعنفة الغازية تقدم الغازات جزءاً من حرارتها إلى مرجل استعادة الحرارة

الضائعة، ويطرح الجزء الباقي إلى الوسط الخارجي، وفي المخطط السابق أعطيت درجات الحرارة للعملية على سبيل المثال.



الشكل 2.8 : مخطط الدارة المركبة على المخطط T-s.

أما الشكل (3.8) فيبين مخطط تيار الحرارة لمحطة الدارة المركبة بدون إحراق وقود إضافي لتوليد البخار.



الشكل 3.8 : مخطط تيار الحرارة لمحطة الدارة المركبة بدون إحراق وقود إضافي لتوليد البخار.

تتراوح درجة حرارة الغاز قبل العنفة الغازية في الوقت الحاضر بين 1100 و1250 °C وبعدها تكون عادةً بين 550 و600 °C. يمكن تبريد هذه الغازات في مرجل استعادة الحرارة الضائعة حتى تصل درجة حرارتها إلى 100 °C. أخفض درجة حرارة لهذه المحطة المركبة تسود في مكثف العنفة البخارية، وهي تتراوح بين 25 و30 °C. وكما هو واضح فإن مجال درجات الحرارة لعملية محطة الدارة المركبة يتحدد بين درجة حرارة دخول الغازات إلى العنفة التي تبلغ حوالي 1250 °C ودرجة حرارة المكثف التي تقع بين 25 و30 °C. إن مبدأ رفع مردود (جودة) المنشأة هو رفع درجة الحرارة الوسطية لإضافة الحرارة وتخفيض درجة الحرارة الوسطية لطرح الحرارة، وهذا المبدأ يمكن تنفيذه في المحطة المركبة بطريقة مثلى، وبالتالي فإن محطات الدارة المركبة تمثل أعلى مردود بين جميع أنواع محطات توليد الطاقة.

تتباين محطات الدارة المركبة التي تعمل بدون إحراق إضافي لتوليد البخار وفقاً لدورة البخار فهناك:

ـــ دورة البخار ذات الضغط الواحد

ـــ دورة البخار ذات الضغط الواحد مع مبخرات إضافية التفافية

ـــ دورة البخار ذات الضغطين

ـــ دورة البخار ذات الضغوط الثلاثة

تتضمن المنشأة ذات الضغط الواحد لخط البخار والمبينة بشكل تخطيطي في الشكل (a4.8) ما يلي:

ـــ جملة العنفة الغازية التي تتألف من ضاغط، حجرة احتراق، عنفة غازية مع مولد.

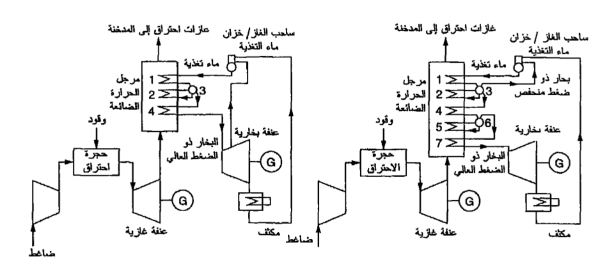
ـــ مرجل استعادة الحرارة الضائعة ذا التدوير الطبيعي المؤلف من أسطوانة الفصل للماء عن البخار (3) والموفر (1a) والمبخر (2b) ومحمص البخار (4).

ـــ جملة العنفة البخارية المؤلفة من العنفة البخارية (6) مع المولد (G) والمكثف (7) ومضخة البخار المتكاثف (8) وساحب الغاز / خزان ماء التغذية (4) ومضخة ماء التغذية (5).

ـــ جملة العنفة البخارية (6) مع المولد (G) والمكثف (7) ومضخة البخار المتكاثف (8) وساحب الغاز/ خزان ماء التغذية (4)، ومضخة ماء التغذية (5).

ينجز البخار المحمص عملاً في العنفة البخارية. يُرسل البخار المشبع إلى خزان ماء التغذية إما من الأسطوانة (الحلة) 2 أو من الأسطوانة (الحلة) 3 بعد مروره على صمام خنق، وبهذا يجري تسخين أولي لماء التغذية.

في توصيلات البخار ذات الضغط الواحد لا تبرد الغازات المغادرة للعنفة بشكلٍ كافٍ ويكون مردود دورة البخار صغيراً بسبب درجة الحرارة الوسطية المنخفضة لإضافة الحرارة. بخلاف دورة البخار التقليدية ذات المراحل المتعددة لعملية التسخين الأولي للماء فإن لماء التغذية هنا درجة حرارة منخفضة.



الشكل 4.8 : (a) محطة الدارة المركبة ذات الضغط الواحد لخط البخار (b) محطة الدارة المركبة ذات الضغطين لخط البخار.

(a)

1 موفر (مسخن ماء أولي)
2 مبخر
3 أسطوانة (حلة) فصل الماء عن البخار
4 محمص بخار

(b)

1 موفر ذو ضغط ملخفض
2 مبخر ذو ضغط منخفض
3 أسطوانة (حلة) فصل ذات ضغط منخفض
4 موفر ذو ضغط عالٍ
5 مبخر ذو ضغط عالٍ
6 أسطوانة (حلة) فصل ذات ضغط عالٍ
7 محمص بخار ذو ضغط عالٍ

تُستخدَم دورة البخار أحادية الضغط ذات المبخرات الملتفة الإضافية على سبيل المثال لأنواع الوقود الرديئة (التي محتواها من الكبريت عالٍ).

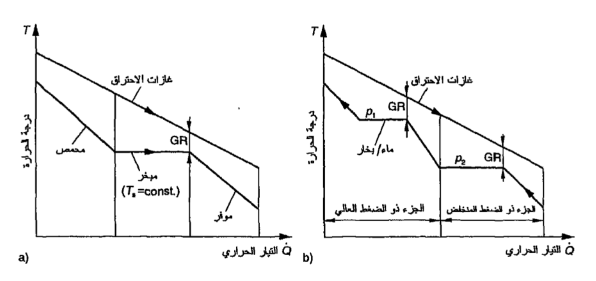
يتألف مرجل استعادة الحرارة الضائعة في محطات الدارة المركبة التي لدورة بخارها ضغطان (الشكل b4.8) من جزء ذي ضغط منخفض (2) يحوي موفراً ومبخراً، وجزء ذي ضغط عالٍ يحوي موفراً ومبخراً ومحمصاً. يستخدم البخار المحمص الطازج المولد في الجزء عالي الضغط في العنفة البخارية. ويُوَلّد في الجزء ذي الضغط المنخفض بخار مشبع يساق قسم منه إلى الجزء ذي الضغط المنخفض من العنفة البخارية ويمرر جزء آخر عبر صمام خنق (ليس مبيناً على الرسم) إلى خزان ماء التغذية (ساحب الغازات).

يجري في المجرى ثنائي الضغط الضغوط تبخر على مرحلتين. يستخدم جزء من البخار القادم من مبخر الضغط المنخفض للتسخين الأولي لماء التغذية ويتمدد الجزء الباقي في عنفة الضغط المنخفض، وتنخفض بذلك درجة حرارة الغازات المغادرة والضياعات الحرارية مع هذه الغازات، وبالتالي يرتفع المردود الإجمالي لمحطة الدارة المركبة.

أما المجرى الثلاثي الضغوط فهو يتألف من جزء يكون فيه ضغط البخار منخفضاً وآخر يكون فيه الضغط متوسطاً والثالث يكون فيه الضغط مرتفعاً، وبهذه الطريقة يكون مردود عملية البخار أعلى منه في الطرق السابقة ولكنه الخيار الأعلى كلفة، لذلك يكون استخدام هذا الطريقة ذا مغزى في الحالات التي يُطلَب فيها المردود الأكبر عندما تكون تكاليف الوقود مرتفعة.

يمكن كذلك تحسين المردود الإجمالي لمحطة الدارة المركبة عن طريق اللجوء إلى التحميص الوسطي وباستخدام ضغوط تفوق قيمتها الضغط الجوي في دورة البخار. إلاّ أن ذلك يؤدي إلى نشوء تكاليف إضافية.

يبين الشكل (5.8) تغيرات درجة الحرارة لغازات الاحتراق ولوسيط العمل الذي هو ماء/بخار، وذلك في مرجل استعادة الحرارة الضائعة لمحطة دارة مركبة أحادية أو ثنائية الضغط في خط البخار بالنسبة للتيار الحراري $\dot{Q}$. يبلغ التدرج (أي فرق درجات الحرارة الأصغري بين غازات الاحتراق ودرجة الإشباع للماء) 10 إلى 15 K.



الشكل 5.8 : تغيرات درجة الحرارة لغازات الاحتراق ولوسيط العمل الذي هو ماء/بخار في مرجل استعادة الحرارة الضائعة (a) للمنشأة ذات الضغط الوحيد (b) للمنشأة ذات الضغطين.

المردود الإجمالي

ينتج المردود الإجمالي لمحطة دارة مركبة غازية وبخارية η_{CC} بدون إحراق وقود إضافي لتوليد البخار كما يلي:

$$\eta_{CC} = (P_{GT} + P_{ST}) / Q_S \quad (1.8)$$

حيث: P_{GT} استطاعة العنفة الغازية، P_{ST} استطاعة العنفة البخارية [MW]

Q_S الاستطاعة الحرارية [MW]، التي تقدم في حجرة احتراق العنفة الغازية.

يحسب المردود الحراري لدورة عمل العنفة الغازية كما يلي:

$$\eta_{GT} = P_{GT} / Q_S \quad (2.8)$$

أما الاستطاعة الحرارية المطروحة من دورة عمل العنفة الغازية فهي:

$$Q_{GT,R} = Q_S - P_{GT} = Q_S\,(1 - \eta_{GT}) \quad (3.8)$$

تُقدَّم هذه الاستطاعة الحرارية إلى مرجل استعادة الحرارة الضائعة للاستفادة منها في دورة عمل العنفة البخارية ولذلك يصبح:

$$Q_{ST,S} = Q_S\,(1 - \eta_{GT}) \quad (4.8)$$

وبالتالي فالمردود الحراري لدورة العنفة البخارية:

$$\eta_{ST} = P_{ST} / Q_{ST,S} \quad (5.8)$$

والاستطاعة المفيدة للعملية البخارية:

$$P_{ST} = \eta_{ST}\, Q_{ST,S} = \eta_{ST}\, Q_S\,(1 - \eta_{GT}) \quad (6.8)$$

بتعويض قيمة P_{ST} من المعادلة (6.8) في المعادلة 1.8 يصبح:

$$\eta_{CC} = [P_{GT} + \eta_{ST}\, Q_S\,(1 - \eta_{GT})] / Q_S \quad (7.8)$$

وبالتالي يصبح:

$$\begin{aligned} \eta_{CC} &= \eta_{GT} + \eta_{ST}\,(1 - \eta_{GT}) \\ &= \eta_{GT} + \eta_{ST} - \eta_{GT}\,\eta_{ST} \end{aligned} \quad (8.8)$$

حيث: η_{GT} المردود الحراري للعنفة الغازية وη_{ST} المردود الحراري للعنفة البخارية.

تبيّن المعادلة (8.8) أن المردود الإجمالي لمحطة دارة مركبة ذات عنفة غازية وبخارية أكبر من مردود المنشأة ذات العنفة الغازية، ولكنه أصغر من مجموع مردودي المنشأة ذات العنفة الغازية

والمنشأة ذات العنفة البخارية. إن المردود العالي للعنفة الغازية هو شرط للوصول إلى مردود إجمالي عال للمنشأة المشتركة.

يُدعى فرق درجات الحرارة الأصغري بين غازات الاحتراق والماء في مرجل استعادة الحرارة الضائعة بـــ "التدرج" (Gradient).

يبين الجدول (1.8) مقارنة بين محطات الدارة المركبة التي بها عنفتان غازيتان GT 13 E2 من صنع شركة ABB مع أنواع مختلفة من دورات العمل البخارية. المردود الإجمالي معطى بدلالة القيمة الحرارية الدنيا للغاز الطبيعي.

الجدول 1.8: مقارنة بين محطات الدارة المركبة ذات الأنواع المختلفة من دورات البخار (عند شروط ISO القياسية أي درجة الحرارة 0°C والضغط 1.013 bar وعند مستوى سطح البحر.

دورة عمل البخار	الاستطاعة [MW] GT	ST	CC	المردود الإجمالي [%]
دورة عمل آحادية الضغط	318.6	148.1	466.7	51.6
دورة عمل ثنائية الضغوط	318.6	172	490.6	45.2
دورة عمل ثلاثية الضغوط	318.6	179.2	497.8	55.0
دورة عمل ثلاثية الضغوط مع تحميص وسطي	318.6	181.1	499.7	55.2

يتضح من الجدول (1.8) أن مردود المنشأة المشتركة يمكن أن يرفع عن طريق أساليب متطورة لدورة عمل البخار (مثلاً من 51.6 % للدورة أحادية الضغط حتى 55.2 % للدورة ثلاثية الضغوط مع تحميص وسطي).

مثال 1.8

ما هو المردود الإجمالي η_{CC} لمحطة دارة مركبة بدون إحراق وقود إضافي لتوليد البخار إذا كان المردود الحراري للعنفة الغازية $\eta_{ST} = 0.38$ وللعنفة البخارية $\eta_{ST} = 0.25$؟ ما هو استهلاك الوقود السائل في حجرة احتراق العنفة الغازية إذا كانت الاستطاعة الكهربائية للمحطة الكاملة P_{el}=350MW؟ القيمة الحرارية الدنيا للوقود السائل الخفيف (المازوت) 42700 kJ/kg.

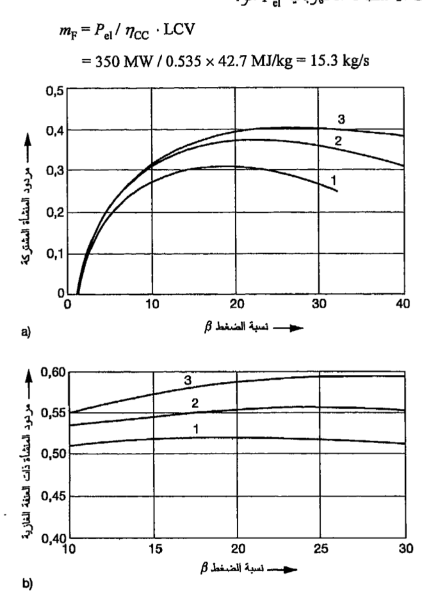
الحل

1. بمعرفة $\eta_{GT} = 0.38$ و $\eta_{ST} = 0.25$ يمكن حساب المردود الإجمالي بالاستعانة بالعلاقة (1.8) كما يلي:

$$\eta_{CC} = \eta_{GT} + \eta_{ST}\,(1 - \eta_{GT})$$
$$= 0.38 + 0.25\,(1 - 0.038) = 0.535$$

2. استهلاك الوقود السائل الخفيف (المازوت) الذي قيمته الحرارية الدنيا LCV = 42700 kJ/kg للمنشأة ذات الاستطاعة الكهربائية P_{el} هو:

$$m_F = P_{el} / \eta_{CC} \cdot \text{LCV}$$
$$= 350 \text{ MW} / 0.535 \times 42.7 \text{ MJ/kg} = 15.3 \text{ kg/s}$$



الشكل 6.8 : (a) مردود المنشأة ذات العنفة الغازية (b) مردود المنشأة المشتركة. درجة حرارة الغاز عند الدخول إلى العنفة الغازية: 1 = 1000°C، 2 = 1150°C، 3 = 1300°C.

يتحدد المردود الإجمالي لمحطة الدارة المركبة بشكل رئيسي عن طريق مردود العنفة الغازية، والشكل (6.8) يبين مردود المنشأة ذات العنفة الغازية وكذلك مردود المنشأة الكاملة بدون إحراق

وقود إضافي لتوليد البخار وعلاقتهما بنسبة الضغط وبدرجة حرارة دخول الغازات إلى العنفة الغازية. يتم الحصول على المردود الإجمالي الأعظمي لمحطة الدارة المركبة عند قيمة مثلى لنسبة الضغط.

2.8 محطة الدارة المركبة مع إحراق وقود إضافي لتوليد البخار

مخطط هذه المنشأة مبين على الشكل (b1.8) تتم عملية إضافة الحرارة (إدخال الحرارة) بحرق الوقود في حجرة الاحتراق للعنفة الغازية وبخلاف حجرة احتراق العنفة الغازية التي يستخدم فيها الغاز الطبيعي أو الوقود السائل الخفيف (المازوت) فإنه يجري حرق الفحم في فرن توليد البخار.

تتألف الاستطاعة الحرارية الإجمالية المضافة (الداخلة) من مقدارين:

$$Q_S = Q_{C.C} + Q_{AF} \tag{9.8}$$

حيث: $Q_{C.C}$ الاستطاعة الحرارية المضافة في حجرة احتراق العنفة الغازية

Q_{AF} الاستطاعة الحرارية المضافة في الفرن الإضافي لتوليد البخار.

وبالاستعانة بالنسبة:

$$f_{AF} = Q_{AF} / Q_{C.C} \tag{10.8}$$

نحصل على الاستطاعة الحرارية الإجمالية المضافة كما يلي:

$$Q_S = Q_{C.C}\,(1 - f_{AF}) \tag{11.8}$$

والمردود الإجمالي لمحطة الدارة المركبة بفرن توليد البخار الإضافي:

$$\eta_{CC} = (P_{GT} + P_{ST}) / Q_S = (P_{GT} + P_{ST}) / Q_{C.C}\,(1 + f_{AF}) \tag{12.8}$$

المردود الحراري للعنفة الغازية:

$$\eta_{GT} = P_{GT} / Q_{C.C} \tag{13.8}$$

والمردود الحراري للعنفة البخارية:

$$\eta_{ST} = P_{ST} / Q_{GT,R} + Q_{AF} \tag{14.8}$$

الاستطاعة الحرارية المطروحة من العنفة الغازية:

$$Q_{GT,R} = Q_{C.C}\,(1 - \eta_{GT}) \tag{15.8}$$

أما المردود الحراري للعنفة البخارية فيعطى بالعلاقة:

$$\eta_{ST} = P_{ST} / (Q_{GT,R} + Q_{AF}) \quad (16.8)$$

$$= P_{ST} / Q_{C.C} (1 - \eta_{GT} + f_{AF})$$

واستطاعة العنفة البخارية:

$$P_{ST} = \eta_{ST} Q_{C.C} (1 - \eta_{GT} + f_{AF}) \quad (17.8)$$

إذا عوضنا P_{ST} في المعادلة 12.8 نحصل على المردود الإجمالي للمحطة مع فرق توليد البخار الإضافي:

$$\eta_{CC} = [P_{GT} + \eta_{ST} Q_{C.C} (1 - \eta_{GT} + f_{AF})] / Q_{C.C} (1 - f_{AF}) \quad (18.8)$$

أو:

$$\eta_{CC} = [(\eta_{GT} + \eta_{ST} (1 - \eta_{GT} + f_{AT})] / (1 + f_{AF}) \quad (19.8)$$

أو

$$\eta_{CC} = [(\eta_{GT} + \eta_{ST} - \eta_{GT} \eta_{ST} + f_{AF})] / (1 + f_{AF}) \quad (20.8)$$

تتعلق قيمة η_{CC} بالدرجة الأولى بمردود العنفة الغازية، أما مردود عملية البخار والجزء الإضافي من الوقود الذي يحرق في فرن توليد البخار فهما عاملا تأثير مهمان.

يؤدي رفع f_{AF} إلى زيادة المردود الإجمالي η_{CC} فقط عندما لا يؤدي هذا إلى تناقص جوهري في η_{ST}. كلما ازدادت درجة حرارة دخول الغازات إلى العنفة الغازية، كلما قلّ تأثير f_{AF} على المردود الإجمالي. عند قيمٍ صغيرة لـــ f_{AF} وبالتالي عند درجة حرارة أقل لغازات الاحتراق بعد الفرن الإضافي لتوليد البخار t_3 (أدنى من 750 °C) يرتفع المردود الإجمالي عن طريق استخدام أفضل للحرارة المطروحة من العنفة الغازية. عند قيم أعلى لـــ f_{AF} يتم الحصول على قيمٍ لـــ t_3 تفوق الـــ 750 °C، وبهذا يرتفع مردود دورة البخار، إلا أن المردود الإجمالي ينخفض.

الخلاصـــة

يتحدد المردود الإجمالي لمحطة الدارة المركبة بشكل رئيسي بمردود العنفة الغازية. إن محطات الدارة المركبة التي لا تحوي فرناً إضافياً لتوليد البخار أبسط وأرخص من المنشآت ذات إحراق الوقود الإضافي بقصد توليد البخار، كما أن مردودها أعلى، إلا أن المنشآت ذات إحراق الوقود الإضافي بقصد توليد البخار أكثر مرونةً من ناحية اختيار نوع الوقود، لأنه من الممكن إحراق الوقود الصلب في الفرن الإضافي (ولا سيما الفحم) وليس الغاز الطبيعي كما يحرق في حجرة احتراق العنفة الغازية.

مثال 2.8

ما هو المردود الإجمالي وكمية الوقود السائل الخفيف اللازمة لمحطة دارة مركبة استطاعتها الكهربائية 350 MW؟

كمية الوقود المضافة إلى فرن توليد البخار الإضافي تعادل 40 % من كمية الوقود المضافة إلى حجرة احتراق مرجل استعادة الحرارة. مردود العنفة الغازية 38 % والبخارية 25 %، القيمة الحرارية الدنيا للوقود السائل (المازوت) 42700 kJ/kg. يُطلب إجراء مقارنة هذه النتيجة مع نتيجة محطة الدارة المركبة بدون إضافة وقود لتوليد البخار الواردة في المثال 1.8.

الحل

1. يحسب المردود الإجمالي للمحطة كما يلي:

$$\eta_{CC} = (\eta_{GT} + \eta_{ST} - \eta_{GT}\,\eta_{ST} + f_{AF}\,\eta_{ST}) / (1 + f_{AF})$$
$$= (0.38 + 25 - 0.38 \times 0.25 + 0.4 \times 0.25) / (1 + 0.4) = 0.544$$

2.الاستهلاك الإجمالي للوقود السائل الخفيف:

$$m_F = P_{el} / (\eta_{CC}\,\text{LCV})$$
$$= 350\ \text{MW} / 0.544 \times 42.7\ \text{MJ/kg} = 18.05\ \text{kg/s}$$

بالمقارنة مع المنشأة بدون فرن توليد البخار فإن مردود محطة الدارة المركبة ذات الفرن لتوليد البخار أصغر وبالتالي فإن استهلاك الوقود أكبر.

مثال 3.8

تتألف محطة دارة مركبة من عنفة غازية استطاعتها الكهربائية $P_{GT} = 240$ MW ومن مرجل استعادة (استرجاع) الحرارة الضائعة وعنفة بخارية استطاعتها الكهربائية $P_{ST} = 120$ MW. تستخدم هذه المنشأة لتأمين الكهرباء والحرارة لمدينة، فإذا كانت مردود استخدام الطاقة لمحطة الطاقة $\eta_{PS} = 87$ % ويستهلك في حجرة احتراق العنفة الغازية $m_F = 12.9$ kg/s من الغاز الطبيعي قيمته الحرارية الدنيا 49 MJ/kg.

المطلوب تحديد:

ـــ الاستطاعة الحرارية Q_H

ـــ الرقم المميز للتيار σ في هذه المنشأة

ـــ المردود الحراري للعنفة البخارية والغازية

ـــ المردود الإجمالي الكهربائي للمنشأة

ـــ درجة حرارة الغازات لدى مغادرتها لمرجل استعادة الحرارة الضائعة.

لذلك تفرض القيم التالية:

ـــ كمية الهواء الأصغرية اللازمة للاحتراق A_{min} =17 kg/kg

ـــ عامل زيادة الهواء في حجرة احتراق العنفة الغازية $\lambda = 2.4$

ـــ السعة الحرارية النوعية لغازات الاحتراق $C_{P,G}$ = 1.05 kJ/kg K

الحل

1. الطاقة المقدمة في الوقود إلى محطة الدارة المركبة:

$$Q_S = m_F \, LCV$$

$$= 12.9 \text{ kg/s} \times 49 \text{ MJ/kg} = 632.1 \text{ MJ/S}$$

2. بما أن مردود استخدام الطاقة للمنشأة 0.87 فإن الاستطاعة الحرارية الممكن الاستفادة منها:

$$Q_H = \eta_{PS} \, Q_S - (P_{GT} + P_{ST})$$

$$= 0.87 \times 632.1 \text{ MJ/s} - (240 + 100) \text{ MW} = 209.93 \text{ MJ/s}$$

3. يُعطى الرقم المميز للتيار في هذه المنشأة المشتركة بالعلاقة:

$$\sigma = (P_{GT} + P_{ST}) / Q_H$$

$$= (240 + 100) \text{ MW} / 209.93 \text{ MJ/s} = 1.62$$

4. المردود الحراري للعنفة الغازية:

$$\eta_{GT} = P_{GT} / Q_S$$

$$= 240 \text{ MW} / 632.1 \text{ MJ/s} = 0.38$$

5. الحرارة التي تحملها الغازات المغادرة للعنفة الغازية:

$$Q_{R,GT} = Q_S - P_{GT}$$

$$= 632.1 \text{ MJ/s} - 240 = 392.1 \text{ MJ/s}$$

6. بما أن الحرارة المضافة إلى المنشأة البخارية $Q_{S,ST}$ مساوية للحرارة المحمولة مع غازات العنفة الغازية المغادرة فإن المردود الحراري لمنشأة العنفة البخارية:

$$\eta_{ST} = P_{ST} / Q_{S,ST}$$
$$= 100\ MW / 392.1\ MJ/s = 0.255$$

7. المردود الكهربائي لمحطة الدارة المركبة:

$$\eta_{el} = \eta_{GT} + \eta_{ST}\,(1 - \eta_{GT})$$
$$= 0.38 + 0.255\,(1 - 0.38) = 0.538$$

أو:

$$\eta_{el} = (P_{GT} + P_{ST}) / Q_S$$
$$= (240 + 100)\ MW / 632.1\ MJ/s = 0.538$$

8. التدفق الكتلي للهواء ولغازات الاحتراق:

للهواء: $m_A = \lambda\ A_{min}\ m_F = 2.4 \times 17\ kg/kg \times 12.9\ kg/s = 526.32\ kg/s$

للغازات: $m_G = m_F + m_A = 12.9 + 526.32 = 539.22\ kg/s$

9. الضياعات الحرارية مع غازات الاحتراق:

$$Q_{G,Loss} = Q_S\,(1 - \eta_{PS})$$
$$= 632.1\ MJ/s\,(1 - 0.87) = 82.17\ MJ/s$$

10. درجة حرارة غازات الاحتراق بعد مغادرتها لمرحل استعادة الحرارة الضائعة (عند مغادرة المنشأة بشكل كامل):

$$t_G = Q_{G,Loss} / m_G\ C_{PG}$$
$$= 82.17 \times 10^3\ kJ/s / 539.22\ kg/s \times 1.05\ KJ/kg\ K = 145°C$$

يعطي الجدول (2.8) مواصفات أكبر محطات دارة مركبة في العالم.

حسب الوضع الراهن فإن مردود العنفات الغازية التي يتم تصنيعها يتراوح بين 35 و38.5 %، ويمكن عن طريق محطات الدارة المركبة الحصول على مردود إجمالي يبلغ 55 حتى 58 % باستخدام الغاز الطبيعي والوقود السائل الخفيف (المازوت).

تتراوح درجة حرارة دخول الغازات إلى العنفة الغازية بين 1000 و1250 °C ودرجة حرارة الدخـــول إلى مرحل استعادة الـــحرارة الضائعة بين 610 و550 ودرجة حرارة الـــخروج منه 110 — 170 °C.

الجدول 2.8: محطات الدارة المركبة (التي هي قيد العمل حتى عام 1995 أو قيد الإنشاء)

موقع المنشأة – البلد	الاستطاعة [MW]	المردود	عام الإنشاء
Bang Pakong ــ تايلاند	750	42	1980
Ambarli ــ تركيا	1350	52	1990
King's Lynn ــ بريطانيا	350	55.4	1996
Topada do Outerio ــ البرتغال	990	—	1998

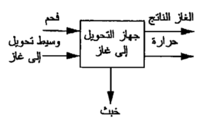
3.8 التوائم مع استخدام الفحم الذي يتم تحويله إلى غاز (المغَوَّز)

1.3.8 تحويل الفحم إلى غاز (التغويز)

عملية التحويل إلى غاز

! *التغويز هو التحويل الكيميائي للفحم عن طريق وسيط إلى غاز قابل للاحتراق.*

يمكن توضيح عملية التحويل إلى الغاز من حيث المبدأ كما يلي (الشكل 7.8).



الشكل 7.8 : مبدأ عمل تحويل الفحم إلى غاز.

فحم + وسيط تحويل إلى غاز + حرارة = وقود غازي + خبث (رماد)

عند تسخين الفحم بمعزل عن الهواء تنطلق أولاً المركبات الطيارة (القابلة للتطاير) الموجودة في الفحم وذلك عند درجات الحرارة العالية (التفكك) ويتشكل فحم الكوك.

الفحم = فحم الكوك + الهيدروكربونات (C_mH_n)

+ قطران + $CO + CO_2 + H_2 + H_2O$ (21.8)

تُحول نواتج التفكك في جهاز التحويل إلى غاز بعد ذلك إلى غاز (ناتج عن الفحم).

إن عملية التحول إلى الغاز عملية ماصة للحرارة (endothermic) ويمكن إنتاج كمية الحرارة اللازمة عن طريق احتراق جزءٍ من الفحم مع الأكسجين داخل جهاز التحويل إلى غاز وذلك وفق التفاعل التالي للاحتراق الكامل أو الناقص:

(22.8) $C + O_2 = CO_2$ (وإنتالبي التفاعل $\Delta H_R = 406$ KJ/mol)

(23.8) $C + {}^1/_2\, O_2 = CO_2$ (إنتالبي التفاعل $\Delta H_R = -123$ KJ/mol)

يستخدم لتحويل الفحم إلى غاز عادةً بخار الماء مع الأكسجين أو الهواء كوسيط تحويل إلى غاز. تتم في عملية التحويل إلى غاز عادة التفاعلات التالية:

التفاعل غير المتجانس للماء (مادة صلبة/ غاز):

(24.8) $C + H_2O$ (بخار) $= CO + H_2$ ، ($\Delta H_R = +199$ KJ/mol)

تفاعل Boudouard غير المتجانس:

(25.8) $C + CO_2 = 2CO$ ، ($\Delta H_R = +162$ KJ/mol)

تفاعل الماء المتجانس (غاز/غاز):

(26.8) $C + H_2O$ (بخار) $= H_2 + CO_2$ ، ($\Delta H_R = -42$ KJ/mol)

تفاعل تشكل الميتان المتجانس:

(27.8) $CO + 3H_2 = CH_4 + H_2O$ ، ($\Delta H_R = -206$ KJ/mol)

ويصف التفاعل التالي مجمل العملية:

(28.8) فحم + وسيط التحويل إلى غاز = $CO + CO_2 + CH_4 + H_2O$ + رماد

يؤخذ إنتالبي التفاعل ΔH_R عند درجة الحرارة 25 °C والضغط 1 atm.

يتعلق تركيب غاز الفحم بوسيط التحويل إلى غاز المستخدم وبدرجة الحرارة التي يجري عندها التحويل. يتم تنظيف الغاز الخام من الغبار باستخدام الهواء (كوسيط تحويل) يتم توليد غاز ذي محتوى عالٍ من (النتروجين) (الآزوت)، وباستخدام بخار الماء ينتج غاز الماء (Watergas) الذي يتألف بشكل رئيسي من الهيدروجين وأول أوكسيد الكربون.

يبين الجدول (3.8) التركيب الوسطي والقيمة الحرارية الدنيا للغاز الناتج.

تُحسب القيمة الحرارية الدنيا للغاز الناتج LCV_G من تركيب الأجزاء التي يتألف منها وقيمها الحرارية الدنيا (CO_2، H_2، CH_4):

$$LCV_G = r_{CO}\, LCV_{CO} + r_{H_2}\, LCV_{H_2} + r_{CH4}\, LCV_{CH_4} \quad (29.8)$$

حيث: r نسبة حجم المركبات CO، H_2، CH_4 [m^3/m^3]

LCV القيمة الحرارية الدنيا للغاز الناتج (G) وللمركبات CO، H_2، CH_4 [MJ/m^3] حسب الحال.

الجدول 3.8: التركيب والقيمة الحرارية الدنيا للغاز الناتج ولغاز الماء (LCV_G)

مركبات الغاز	الغاز المولّد	غاز الماء
[%] CO	25	40
[%] H_2	15	50
[%] CO_2	8	5
[%] N_2	52	4
[%] H_2O	—	1
[MJ/m_3] LCV_G	5.04	12.6

تصنف الغازات التي تفوق قيمتها الحرارية الدنيا 12.5 MJ/m^3 بأنها غازات قوية وإلاّ تعتبر غازات ضعيفة.

مردود التحويل إلى غاز هو النسبة بين طاقة الارتباط الكيميائي للغاز الناتج إلى الحرارة المضافة مع الوقود.

$$\eta_{Ga} = LCV_G \, V_G / LCV \quad (30.8)$$

حيث: LCV_G القيمة الحرارية الدنيا للغاز (المولّد) [MJ/m^3]

V_G حجم الغاز الناتج [m^3/kg]. متر مكعب لكل كغ وقود

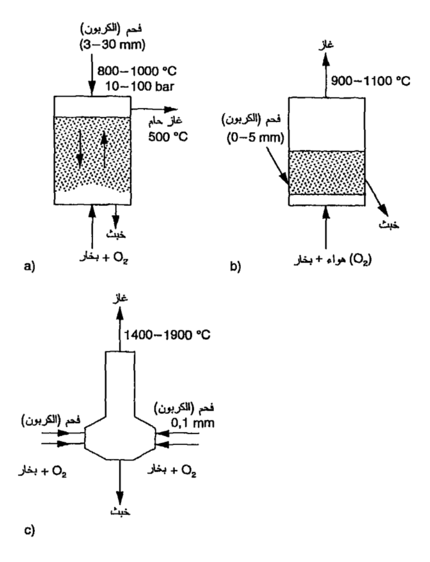
LCV القيمة الحرارية الدنيا للوقود [MJ/kg].

درجة تحويل الغاز هي النسبة بين محتوى الغاز الناتج من الكربون وبين محتوى كمية الكربون المرسلة إلى جهاز التغويز:

$$\eta_C = \text{محتوى الغاز الناتج من الكربون/كمية الكربون الصافية المرسلة إلى جهاز التغويز} \quad (31.8)$$

2.3.8 جهاز التحويل إلى غاز (التغويز)

هناك ثلاث طرائق سائدة عملياً: طريقة الطبقة الثابتة، طريقة الطبقة الدوامية، طريقة التيار الطيار (الشكل 8.8).



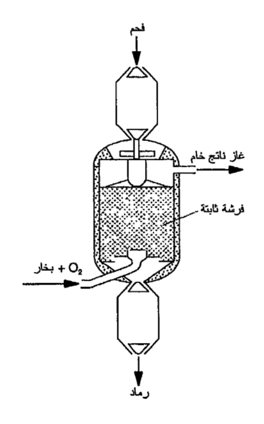
الشكل 8.8 : طرائق التحويل إلى غاز (a) جهاز التحويل ذو الطبقة الثابتة (b) جهاز التحويل ذو الطبقة الدوامية (c) جهاز التحويل ذو التيار الطيار.

محول الغاز ذو الطبقة الثابتة

تستخدم في هذه الطريقة غالباً محولات Lurgi ذات الضغط (الشكل 9.8). يجري توزيع الكربون ذي الحبيبات التي يتراوح قطرها بين 3 و30 mm بشكل متساوٍ من الأعلى على الفرشة الثابتة. يستخدم الأوكسجين وبخار الماء كوسيط تحويل. يجري في المواقع المختلفة من المفاعل تجفيف وتحويل إلى غاز وجزئياً احتراق للكربون.

تسود درجة الحرارة القصوى (تحت درجة حرارة ذوبان الرماد) في منطقة الاحتراق فوق الشبكة وبجوارها. يتصاعد الغاز الناتج ذو المحتوى المرتفع من الميتان ماراً عبر الفرشة، ويتبرد أثناء

ذلك حتى درجة الحرارة 300 أو 650 °C. يُفصل كلٌّ من الغبار والهيدروكربونات القابلة للتكاثف من غاز الكربون. شروط التشغيل هي كما يلي: الضغط 10 حتى 100 bar، درجة الحرارة 800 حتى 1000 °C (تحت درجة حرارة تليُّن الرماد). يصل إنتاج محولات الغاز من نوع Lurgi إلى t/h 75. هذا وقد تم تطوير محول غاز ذي طبقة ثابتة مع سحب للرماد وهو بالحالة المائعة من قبل شركة الغاز البريطانية British Gas/Lurgi.

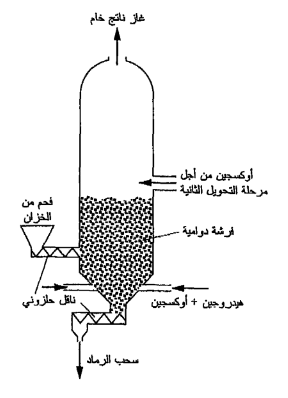


الشكل 9.8 : مخطط محوّل غاز من نوع Lurgi ذي طبقة ثابتة.

محول الغاز ذو الطبقة الدوامية

يمكن تحويل الكربون الذي يتراوح قطر حبيباته بين 1 و5 mm عند الضغط الجوي ودرجة الحرارة 800 إلى 1000 °C إلى غاز في محول غاز ذي طبقة دوامية من نوع Winkler باستخدام الأوكسجين والبخار عند درجة حرارة أدنى من درجة تليُّن الرماد. يبين الشكل (10.8) مخطط مولد الغاز من نوع Winkler. تمتاز هذه الطريقة ببساطة المعالجة الأولية لوقود الكربون وانخفاض استهلاك الأوكسجين والتشغيل الجيد عبر مجالات واسعة للاستطاعة. ترتفع في محوّل Winkler ذي درجة الحرارة العالية الاستطاعة النوعية للمحوّل (الكسب في الغاز ومردود التحويل إلى غاز)

وذلك جرّاء الضغط العالي (10 إلى25 bar) ودرجة الحرارة المرتفعة (1000 حتى 1600 °C). ترتفع درجة تحويل الكربون حتى 99 % عن طريق استرجاع الرماد المحمول مع الغاز الخام.



الشكل 10.8 : محوّل غاز ذي طبقة دوامية من نوع Winkler.

جهاز التحويل ذو التيار الطيار

يتعرض في هذا الجهاز (الشكل 11.8) الكربون المطحون الناعم الذي يبلغ قطر حبيباته 0.1 mm لوسيط التحويل الذي هو الأوكسجين وبخار الماء، ويجري التحويل إلى غاز في غيمة غبار طيارة عند درجة حرارة تصل إلى 1900 °C وضغط يتراوح بين 25 و 40bar. يتكتل الجزء الأكبر من الرماد الذائب ويتم سحبه من أسفل الجهاز، أما الرماد الطيار فيتم تنظيف الغاز الناتج منه. هناك الطرائق الصناعية التالية التي تستخدم التيار الطيار: PRENFLO، TEXACO، SHELL ... إلخ. في طريقة TEXACO يطحن الكربون بالحالة الرطبة ويضاف على شكل عجينة مشبعة بالماء من أعلى جهاز تحويل الغاز، وتجري عملية التحويل إلى غاز عند ضغوط تصل إلى 80 bar، وتكون درجة الحرارة بحدود 1400 °C، وذلك في غيمة من الغبار الطيار. يتم التخلص من الخبث السائل عن طريق حقنه بالماء وتبريده ثم سحبه.

مقارنة طرائق التحويل إلى غاز

أهم القيم المميزة لطريقة تحويل إلى غاز هي:

ـــ كمية الغاز التي يتم كسبها [كغ لكل كغ وقود]

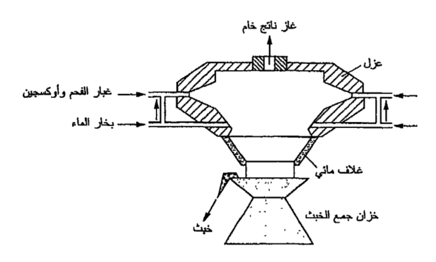
ـــ الاستهلاك من وسيط التحويل إلى غاز [كغ لكل كغ وقود]

ـــ تركيب الغاز الناتج.

ـــ القيمة الحرارية للغاز الناتج.

ـــ درجة تحويل الكربون.

ـــ المردود الحراري لعملية التحويل إلى غاز.



الشكل 11.8 : مخطط محوّل غاز تيار طيار.

الجدول 4.8: الغاز المكتسب وكمية الوسيط اللازمة للتحويل إلى غاز [kg لكل kg فحم].

	الطبقة الثابتة	الطبقة الدوامية	التيار الطيار
كميـــة الغـــاز الناتجة عن عملية التحويل إلى غاز [kg/kg]	2.13	5.3	2.15
كمية الأوكسجين اللازم لعملية التحويل [kg/kg]	0.71	—	1.07
كمية الهواء اللازمة لعملية التحويل [kg/kg]	—	3.75	—
كمية البخار اللازمة لعملية التحويل [kg/kg]	0.48	0.61	0.14

تبين الجداول من (4.8) إلى (6.8) القيم المميزة لمختلف طرائق التحويل إلى غاز (جهاز التحويل ذو الطبقة الثابتة، ذو الطبقة الدوامية، ذو التيار الطيار). القيم الموضوعة هي بالنسبة لكربون رديء

تركيبه العنصري (كنسبة وزنية) كما يلي: C = 80.1، H = 3.5، O = 2.2، N = 1.3، S = 1.2، الرماد 6.7، الماء 5. القيمة الحرارية الدنيا لهذا الفحم 31 MJ/kg. الوسيط المستخدم في عملية التحويل إلى غاز هو الأوكسجين/ بخار الماء في كلٍّ من جهاز التحويل ذي الطبقة الثابتة وذي التيار الطيار، أما في جهاز التحويل ذي الطبقة الدوامية فإن الوسيط هو الهواء/بخار الماء.

الجدول 5.8: التركيب [%] والقيمة الحرارية للغاز الجاف.

المركبات	الطبقة الثابتة	الطبقة الدوامية	التيار الطيار
CO	21	18	55
H_2	39	21	34
CH_4	10	1	—
N_2	2	51	1
CO_2	28	9	10
القيمة الحرارية [MJ/m_3]	10.5	4.9	10.7

الجدول 6.8 مردود عملية التحويل إلى غاز η_{Ga}، درجة تحول الفحم η_c، المردود الحراري لمختلف عمليات التحويل إلى غاز $\eta_{th,Ga}$

	الطبقة الثابتة	الطبقة الدوامية	التيار الطيار
η_{Ga}	89	73	79
η_c	99	95	99
$\eta_{th,Ga}$	94	92	95

3.3.8 محطات الدارة المركبة مع استعمال الغاز الناتج عن تحويل الكربون إلى غاز

المعطيات التفصيلية للمنشأة

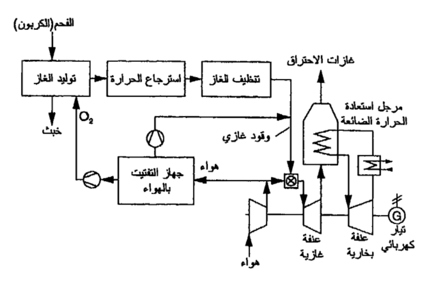
يبين الشكل (12.8) شكلاً مبسطاً لمحطة دارة مركبة لتوليد الطاقة تستخدم الكربون المتحول إلى غاز وهي تتضمن ثلاثة أجزاء رئيسية:

— جهاز تحويل الكربون إلى غاز مع معدات لتنقية الغاز والتفتيت بالهواء

— منشأة ذات عنفة غازية ومرجل لاستعادة الحرارة الضائعة

— منشأ ذات عنفة بخارية.

كان من المفترض أن تبدأ في عام 1996* المحطة التجريبية KoBra التي تستخدم الفحم البني باستطاعة كهربائية قدرها KW 367 بإحراق فحم الكوك المتبقي في مرجل ذي فرشة دوامية. يُمكّن مبدأ KoBra من تحقيق مردود يزيد عن مردود المنشآت التقليدية بحدود 30 إلى 45 % (صافي).



الشكل 12.8 : مخطط عمل الدارة المركبة التي تستخدم عملية تحويل الكربون إلى غاز.

كذلك سينخفض انبعاث SO_2، NO_x والغبار بشكل واضح. ويجري التخطيط لوحدات KoBra استطاعتها 700 إلى MW 1000. تتألف هذه المنشأة من الأجزاء التالية:

ـــ مجفف كربون ذو طبقة دوامية.

ـــ جهاز تحويل الكربون إلى غاز من النوع Winkler الذي يعمل عند درجة حرارة مرتفعة وله طبقة دوامية.

ـــ الدارة المركبة التي تحوي عنفة غازية ومرجل استعادة الحرارة الضائعة وعنفة بخارية.

يبين الجدول (7.8) معلومات تفصيلية عن المنشأة التجريبية KoBra.

يسخن الكربون البني الخام الذي محتواه من الماء 40 إلى 60 % في مسخن أولي حتى درجة الحرارة 65 °C ثم يضاف إلى المجفف الذي يعمل عند درجة الحرارة 110 °C والذي يحوي طبقة دوامية، ويجري تجفيفه بحيث تصبح نسبة الماء المتبقي فيه 12 %. تقدم الطاقة اللازمة للتجفيف على شكل بخار يُمرَّر في مبادلات حرارية غاطسة.

* قبل عام من تأليف الكتاب (المترجم).

الجدول 7.8: مواصفات المنشأة التجريبية KoBra.

التسمية	القيمة
1. الاستطاعة الإجمالية [MW]	367
2. المردود الكهربائي [%]	45
3. الوقود	فحم بني (كربون بني)
ـــ القيمة الحرارية للفحم الخام أو الفحم الجاف [MJ/kg]	18.6/9.9
4. التدفق الحراري مع الوقود [MJ/s]	748
5. التحويل إلى غاز بطريقة Winkler ذات درجة الحرارة العالية	
ـــ تدفق الفحم [t/h]	160
ـــ تدفق الهواء اللازم لجهاز التحويل إلى غاز [kg/s]	90.5
ـــ تدفق الغاز الخام الناتج (الرطب) [kg/s]	140
ـــ درجة تحويل الفحم [%]	91
ـــ مردود الغاز البارد [%]	72
ـــ القيمة الحرارية للغاز الناتج [MJ/kg]	4.2
6. تبريد الغاز الخام الناتج	
a) بخار ذو ضغط عالٍ ـــ ضغطه [bar]، درجة حرارته [°C]	330/128
التدفق [kg/s]	90
b) بخار ذو ضغط متوسط ـــ ضغطه [bar] درجة حرارته [°C]	246/37
التدفق [kg/s]	15
7. العنفة البخارية (شركة MAN)	
ـــ الاستطاعة [MW]	155
ـــ البخار الطازج	
ضغطه [bar] درجة الحرارة [°C] تدفقه [kg/s]	103/520/110
ـــ التحميص الوسطي	
ضغطه [bar] درجة الحرارة [°C] التدفق [kg/s]	116/520/29
ـــ بخار الاستنـــزاف	
ضغطه [bar] درجة الحرارة [°C] التدفق [kg/s]	440/17 (من 8.5 إلى 50)
8. ضغط المكثف [bar]	0.05
9. العنفة الغازية (Siemens V94.3)	
ـــ استطاعتها [MW]	212
ـــ التدفق الكتلي [kg/s] لـــ الهواء/ الوقود الغازي/ غازات الاحتراق	611/39/562
ـــ نسبة الضغط في الضاغط	16
ـــ درجة حرارة الغازات لدى دخولها إلى العنفة- عند خروجها [°C]	550/1120

يُحَوَّل الكربون البني المجفف في جهاز التحويل إلى غاز ذي الطبقة الدوامية من نوع Winkler. ينقل الوقود إلى جهاز التحويل إلى غاز عن طريق جملة ممرات خاصة بواسطة ناقل حلزوني أو أنبوب مائل. يؤخذ هواء التحويل إلى غاز من ضاغط العنفة الغازية عند الضغط النهائي، وبعد رفع ضغطه حتى 30 bar ليستخدم كوسيط تحويل إلى غاز. يصل مردود تحويل الكربون إلى 91 %. يُفصَل الغبار من الغاز الخام الناتج في فرازة ساخنة، ويضاف إلى الطبقة الدوامية عن طريق أنبوب هابط. أما النواتج السفلية (التي تتألف من وقود غير مُحَوَّل والرماد) فيتم إخراجها عبر جملة خاصة. يتم تخليص الوقود الغازي قبل استخدامه للعنفة الغازية من الهيدروكربونات الثقيلة ومن روابط الكبريت.

ترُفَع استطاعة المجموعة (غازي + بخاري) عن طريق ترطيب الوقود الغازي المُنقَّى، ويؤدي هذا إلى تخفيض تشكل NO_x في حجرة احتراق العنفة الغازية. يسخن الغاز النظيف أخيراً بواسطة بخار متوسط الضغط حتى درجة الحرارة 220 °C قبل إرساله إلى حجرة احتراق العنفة الغازية وإحراقه.

العنفة مصممة بحيث تكون درجة الحرارة عند الدخول إليها 1160 °C. تستخدم حرارة الغازات المغادرة للعنفة بدرجة حرارة 550 °C في مرجل استعادة الحرارة الضائعة لتوليد البخار. يتألف هذا المرجل من مسخن أولي للبخار (الماء) المتكاثف وموفر (مسخن أولي للماء) ذي ضغط متوسط وآخر ذي ضغط عالٍ ومبخر ذي ضغط متوسط وآخر ذي ضغط عالٍ ومحمص وسطي.

يُحَمِّص البخار المشبع القادم من مبرد الغاز الخام والذي يكون ضغطه عالياً أو متوسطاً في مرجل استعادة الحرارة الضائعة. العنفة البخارية التي تسحب البخار المتكاثف (MAN) ذات صناديق ثلاثة لثلاثة أجزاء ذات ضغط عالٍ ومتوسط ومنخفض ذي مجريين.

تتألف مجموعة (كتلة) العنفة من عنفة غازية رباعية المراحل (صنع شركة Siemens) من النوع V 94.3 (50 Hz، 220 MW) وضاغط ذي 17 مرحلة نسبة انضغاطه تساوي 16 وحجرتي احتراق أفقيتين تحتويان على حراقات ذات انبعاث قليل لغازات NO_x (Low NO_x- Burners).

منشأة ELCOGAS

تركب في Puertollano (اسبانيا)* محطة دارة مركبة من نوع حديث يتم فيها تحويل الفحم إلى غاز. الاستطاعة الكهربائية القائمة (Brutto) لهذه المنشأة هي 335 MW والصافية 300 MW (Net).

---

* بتاريخ تأليف الكتاب عام 1997 (المترجم).

تستخدم فيها عنفة غازية Siemens من النوع V 94.3، درجة حرارة دخول الغاز إليها 1120 °C. واستطاعتها 200 MW، كذلك توجد عنفة بخارية استطاعة خرجها 138 MW.

في جهاز تحويل الفحم إلى غاز الذي أنتجته شركة Krupp-Koppers يستخدم 180000 m^3/h من الغاز الذي قيمته الحرارية الدنيا 10.6 MJ/m^3 وهو مستخرج من مزيج وقود (يتألف من 50% فحم و50 % فحم كوك من النفط -Petrol-Coke). يُستخدم هنا مولد بخار ذو تدوير قسري وانضغاط في ثلاث مراحل للاستفادة من حرارة غازات العنفة الغازية في توليد البخار . مواصفات البخار: ضغط البخار الطازج 115 bar ودرجة حرارته 508 °C، التحميص الوسطي عند 29 bar و 517 °C، ضغط المكثف 0.07 bar.

يصل المردود الصافي للمنشأة إلى 45 %. تخفض هنا عملية انبعاث الغازات الضارة بحيث يصبح انبعاث SO_2 أقل من 10 mg/m^3 وانبعاث NO_x حتى 60 mg/m^3.

9 محطات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة*

1.9 الأرقام المميزة لمحطات التوليد المشترك للكهرباء وللحرارة

محطة التوليد المشترك للكهرباء وللحرارة

> *تقوم هذه المحطات وبنفس الوقت بتأمين الطاقة الكهربائية بالإضافة إلى الطاقة الحرارية اللازمة للاستعمالات الصناعية أو التدفئة.*

تدعى المحطات الكبيرة التي تقوم بتأمين الطاقة الكلية (تيار كهربائي وحرارة تسخين) للمنشآت الصناعية أو للمدن بمحطة التدفئة وتوليد الكهرباء المركزية، أما المجموعات الصغيرة التي تؤمن الطاقة (كهرباء + حرارة) لمجموعة من الأبنية السكينة أو المصانع أو المكاتب أو لمشاريع أخرى فتدعى بمحطة التدفئة وتوليد الكهرباء اللامركزية.

لمحطة التوليد المشترك مزية الوفر الكبير في الطاقة الأولية، إذا ما قورنت بمحطات التوليد الكهرباء البخارية التقليدية (مع مكثف) أو بمحطات التدفئة أو بالمراجل (الغلاّيات) المستقلة.

الرقم المميز للتيار الكهربائي

من أجل تقييم محطة التوليد المشترك للكهرباء والحرارة من ناحية استهلاكها للطاقة هناك رقمان مميزان: الرقم المميز للتيار الكهربائي σ وعامل استهلاك الوقود β.

> *يُعرَّف الرقم المميز للتيار في محطة توليد مشترك للكهرباء والحرارة σ بأنه النسبة بين الاستطاعة الكهربائية للمحطة واستطاعتها الحرارية.*

* Combined Power and Heat Generation — المترجم

$$\sigma = P_{el} / Q_H \quad (1.9)$$

في محطات التدفئة وتوليد الكهرباء ذات عنفات سحب البخار وتكثيفه تنتج الاستطاعة الكهربائية كمجموع للمقادير الناتجة عن تمدد البخار في مراحل العنفة المختلفة، أي:

$$P_{el} = \sum m_{vi} \Delta h_{vi} \eta_m \eta_G \quad (2.9)$$

حيث: m_{vi} التدفق الكتلي للبخار في المرحلة i من العنفة

Δh_{vi} الهبوط الحقيقي للإنتالبي في المرحلة i من العنفة

η_m المردود الميكانيكي لمجموعة العنفة

η_G مردود المولدة الكهربائية.

تُحسب الاستطاعة الحرارية Q_H لمحطة التدفئة وتوليد الكهرباء كما يلي:

$$Q_H = m_{HV} (h_{HV} - H_{Hc}) = m_{HW} (h_{HWexit} - h_{HWent}) \quad [kW] \quad (3.9)$$

حيث: m_{HV} التدفق الكتلي لبخار التسخين في المكثف [kg/s]

m_{HW} التدفق الكتلي لماء التسخين [kg/s]

h_{HV} الانتالبي النوعي لبخار التسخين [kg/kg] قبل مكثف التسخين (التدفئة)

h_{HC} الانتالبي النوعي لبخار التسخين بعد مكثف التسخين [kg/kg]

h_{HWexit} وh_{HWent} الإنتالبي النوعي لماء التسخين قبل وبعد مكثف التسخين [kJ/kg].

في محطة التدفئة وتوليد الكهرباء التي تحوي عنفة ذات ضغط خلفي فإن الرقم المميز للتيار σ معيار مهم لتقدير جودة تنفيذ العملية. كذلك لـــ σ أهمية خاصة في محطات الطاقة الكهربائية ذات سحب البخار وتكثيفه.

عامل استهلاك الوقود

يُعرَّف عامل استهلاك الوقود كما يلي:

$$\beta = (Q_{F,TPS} - Q_{F,con}) / Q_H \quad (4.9)$$

حيث: $Q_{F,TPS}$ الحرارة المحمولة مع الوقود المستهلك في محطة التدفئة وتوليد الكهرباء [Kw]

$Q_{F,con}$ الحرارة المحمولة مع الوقود المستهلك في محطة الطاقة الكهربائية ذات سحب البخار وتكثيفه [kW].

والاستهلاك الحراري مع الوقود [kJ/s] لمحطة الطاقة الكهربائية ذات سحب البخار وتكثيفه:

(5.9) $$Q_{F,con} = m_{F,con}\ LCV$$

والاستهلاك الحراري مع الوقود [kJ/s] لمحطة الطاقة الحرارية والكهربائية (thermal power station)

(6.9) $$Q_{F,TPS} = m_{F,TPS}\ LCV$$

حيث: $m_{F,con}$ استهلاك الوقود في المحطة الكهربائية ذات سحب البخار وتكثيفه [kg/s]

$m_{F,TPS}$ استهلاك الوقود في محطة التدفئة وتوليد الكهرباء [kg/s]

LCV القيمة الحرارية الدنيا للوقود [kJ/kg].

كذلك يمكننا كتابة:

(7.9) $$Q_{F,con} = P_{el} / \eta_{con}$$

كذلك

(8.9) $$Q_{F,TPS} = (Q_H + P_{el}) / \eta_{TPS} = Q_H (1 + \sigma) / \eta_{T,PS}$$

حيث: η_{con} وη_{TPS} مردود محطة الطاقة الكهربائية ذات سحب البخار وتكثيفه ومردود محطة التدفئة وتوليد الكهرباء.

المردود الإجمالي لمحطة التدفئة وتوليد الكهرباء

تتألف الاستطاعة المفيدة الجاهزة للاستعمال من الطاقة الكهربائية P_{el} والاستطاعة الحرارية Q_H.

تقدم درجة الاستفادة من الطاقة في محطة التدفئة وتوليد الكهرباء فكرة عن الجزء المفيد من الاستطاعة $(P_{el} + Q_H)$ الذي يأتي مع الوقود المستخدم أي $Q_{F,TPS}$.

(9.9) $$\eta_{TPS} = (P_{el} + Q_H) / Q_{F,TPS}$$

المردود الكهربائي لمحطة التدفئة وتوليد الكهرباء.

(10.9) $$\eta_{el} = P_{el} / Q_{F,TPS}$$

بمراعاة المردود الحراري لدورة العمل (η_{th}) ومردود مولد البخار (η_{SG}) والمردود الداخلي للعنفة البخارية (η_{iT}) والمردود الكهربائي ـــ الميكانيكي للمولدة (η_G) والاستهلاك الذاتي لمحطة الطاقة η_{is} ينتج المردود الكهربائي.

(11.9) $$\eta_{el} = \eta_{SG}\ \eta_{th}\ \eta_{iT}\ \eta_G$$

ولحساب المردود الحراري لعملية تحول الحرارة في محطة الطاقة البخارية تطبق العلاقة التالية:

$$\eta_{th} = W_u / Q_S \quad (12.9)$$

أو: $\eta_{th} = (h_v - h_{ev}) / (h_v - h_{Fw})$

حيث: W_u العمل المفيد للعنفة [J]

Q_S كمية الحرارة المضافة [J]

h_v، h_{ev}، h_{Fw} الانتالبي النوعي لـ البخار الطازج، البخار المنفلت (بعد العنفة)، ماء التغذية (عند مدخل المرجل) [kJ/kg].

مردود مولد البخار:

$$\eta_{SG} = Q_{SG}/Q_F \quad (13.9)$$

حيث: Q_{SG} الاستطاعة الحرارية المفيدة لمولد البخار [W]

Q_F الحرارة المضافة مع الوقود عند إحراقه في مولد البخار [W].

2.9 محطات التدفئة وتوليد الكهرباء ذات الضغط المقابل وذات سحب البخار وتكثيفه

! *يُستخدم في محطات التدفئة وتوليد الكهرباء نوعان من العنفات البخارية: ذات الضغط المقابل (Back Pressure) والعنفات البخارية ذات سحب البخار وتكثيفه (exctracting and condensing) للاستفادة من حرارته.*

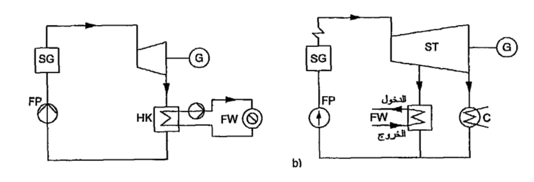
يختلف هذان النوعان بالدرجة الأولى من ناحية ضغط البخار عند مخرج العنفة. في النوع الثاني من المحطات يغادر البخار المنفلت عنفة التكثيف عند ضغط تخلخل يبلغ 0.04 إلى 0.06 bar، ويمر في مكثف، وهناك يفقد حرارته ويعطيها إلى ماء التبريد، مما يؤدي إلى تكاثفه.

تبلغ درجة حرارة ماء التبريد 25 إلى 35 °C، والحرارة المطروحة من المكثف لا يمكن الاستفادة منها ثانية. إلاّ انه يمكن الحصول على حرارة عن طريق سحب البخار من عنفة التكاثف عند ضغط معين.

في العنفة البخارية ذات الضغط المقابل (الخلفي) يتم رفع ضغط البخار عند مخرج العنفة حتى قيم تتناسب مع درجات الحرارة اللازمة للمستهلك، ويكون الضغط عادة أكبر من 1 bar. إذا أريد استخدام محطة تدفئة وتوليد كهرباء لتأمين الحرارة من أجل عمليات تكنولوجية (تقنية) في منشأة صناعية فإن ضغط الخروج من عنفة الضغط المقابل يتحدد وفقاً لضغط البخار اللازم للعملية التقنية.

يجب أن تكون درجة حرارة البخار المنفلت من العنفة في المحطات المستخدمة لتدفئة المدن مرتفعة بحيث يمكن إيصال ماء التسخين إلى درجة الحرارة المطلوبة في مجموعة التدفئة.

النموذجان الرئيسيان لمحطات التدفئة وتوليد الكهرباء مبينان على الشكل (1.9).



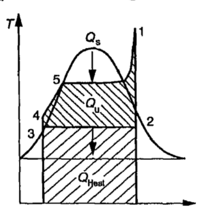
SG مولد بخار	HK مكثف التسخين
ST عنفة بخارية	FW شبكة توزيع الحرارة
C مكثف	FP مضخة التغذية بالماء

الشكل 1.9 : مبدأ وصل محطة التدفئة وتوليد البخار (a) ذات عنفة التكاثف التي تعمل عند ضغط خلفي (مقابل) (b) ذات سحب البخار وتكثيفه للاستفادة من حرارته.

يبين الشكل (2.9) بشكل مبسط دورة عمل محطة تدفئة وتوليد كهرباء ذات ضغط خلفي على المخطط T-s. يغادر البخار المنفلت العنفة البخارية عند ضغط مرتفع (أعلى من 1 bar) وتستخدم حرارة تكاثفه لتوليد طاقة حرارية. يكون انخفاض الانتالبي للبخار ضمن العنفة وكذلك الاستطاعة الكهربائية للمحطة الحرارية ذات الضغط الخلفي أقل منهما في حالة المنشأة ذات سحب البخار وتكثيفه للاستفادة من حرارته.

المساحة الموجودة داخل دورة العمل على المخطط T-s تعبر عن الحرارة المفيدة Q_u المساوية للعمل المفيد في دورة العمل W_u. أما المساحة أسفل الخط 2–3 في المخطط T-s فهي حرارة

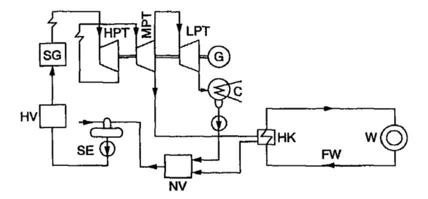
التسخين الممكن الاستفادة منها نظرياً $Q_{heat,th}$، والمساحة تحت الخط 1–4 تمثل الحرارة المضافة لدورة العمل Q_S. إن حرارة التسخين الممكن الاستفادة منها فعلياً Q_{heat} أقل من $Q_{heat,th}$ النظرية.



الشكل 2.9 : دورة عمل المحطة الحرارية ذات الضغط الخلفي على المخطط T-s.

في المحطات ذات الضغط الخلفي فإن تقديم الطاقة الكهربائية والحرارية مترابط بشكل كبير، وهذه المحطات لا تستخدم إلاّ في المنشآت الصناعية.

يتم سحب حرارة التدفئة (التسخين) في أكثر الأحيان باستخدام العنفات ذات سحب البخار وتكثيفه (الشكل 3.9).

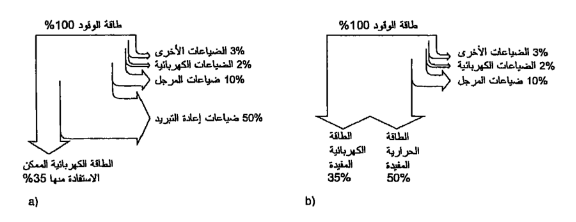


SG مولد بخار ذو محمص وسطي
HPT عنفة الضغط العالي
MPT عنفة الضغط المتوسط
LPT عنفة الضغط المنخفض
C مكثف
HK مكثف التسخين
FW شبكة توزيع الحرارة
W مستهلك حرارة
NV مسخن أولي للماء ذو ضغط منخفض
HV مسخن أولي للماء ضغطه مرتفع
SE خزان ماء تغذية مع مضخة

الشكل 3.9 : سحب الطاقة الحرارية (حرارة التسخين) من عنفة سحب البخار وتكثيفه.

يتراوح مردود المحطات الكهربائية التي تحوي عنفة تكاثف بين 36 و43 %، أما المحطات ذات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة فيصل فيها مردود استخدام الطاقة $\eta_{cog} = 0.8$ حتى 0.85.

ويبين الشكل (4.9) مخطط توزع الطاقة النمطي لكلا النوعين.



الشكل 4.9 : مخطط توزع الطاقة (a) من أجل محطة طاقة كهربائية ذات عنفة تكاثف، (b) من اجل محطة تدفئة وتوليد الكهرباء.

مثال 1.9

من أجل مجموعة بعنفة ذات ضغط خلفي معلوم ما يلي:

مواصفات البخار الطازج قبل العنفة: $p_1 = 100\text{bar}$، $t_1 = 550°\text{C}$، الضغط المقابل $p_2 = 3\text{bar}$

تدفق البخار الكتلي: $m = 50$ kg/s، المردود الداخلي للعنفة $\eta_T = 0.9$ ومردود المولد الكهربائي $\eta_G = 0.98$، المطلوب حساب:

- بالاستعانة الكهربائية للمجموعة،
- المردود الكهربائي،
- الرقم المميز للتيار،
- عند دخل الاستفادة من الطاقة لمحطة التوليد المشترك للحرارة والكهرباء إذا كانت الضياعات الحرارية عند المستهلك $\eta_{LOS} = 20$ %.

الحل:

1. بالاستعانة بمخطط *h-s* نحدد:

انتالبي البخار الطازج عند $p_1 = 100$ bar و$t_1 = 550°\text{C}$، $h_1 = 3500$ kg/kg.

انتالبي البخار المنفلت من العنفة عند تمدد ايزنتروبي للبخار من p_1 إلى p_2: $h_{2s} = 2630$ kJ/kg.

2. الانتالبي الفعلي للبخار المنفلت عند تمدد غير عكوس:

$$h_2 = h_1 - \eta_T (h_1 - h_{2s})$$
$$= 3500 - 0.9\ (3500 - 2630) = 2717 \text{ kJ/kg}$$

3. انتالبي ماء تغذية المرجل عند p_2 (من الجدول A.5):

$$h_{FW} = 584.27 \text{ kJ/kg}$$

4. العمل النوعي الفعلي للعنفة (هبوط الإنتالبي في العنفة):

$$w_T = h_1 - h_2 = 3500 - 2717 = 783 \text{ kJ/kg}$$

5. كمية الحرارة المضافة لكل 1 kg بخار:

$$q_s = h_1 - h_{FW} = 3500 - 584.27 = 2915.73 \text{ kJ/kg}$$

6. المردود الحراري الفعلي:

$$\eta_{th} = w_T / Q_s = 783 / 2915.73 = 0.269$$

7. المردود الكهربائي:

$$\eta_{el} = \eta_{th}\ \eta_G = 0.269 \times 0.98 = 0.263$$

8. الاستطاعة الكهربائية:

$$P_{el} = m\ w_T\ \eta_G$$
$$= 50 \text{ kg/s} \times 783 \text{ kJ/kg} \times 0.98 = 38367 \text{ kW}$$

9. الاستطاعة الحرارية المفيدة:

$$Q_u = m\ (h_2 - h_{FW})\ (1 - \eta_{LOS})$$
$$= 50 \text{ kg/s}\ (2717 - 584.27)\ (1 - 0.2) = 85309.2 \text{ kW}$$

10. الرقم المميز للتيار

$$\sigma = P_{el} / Q_u = 38367 / 85309.2 = 0.45$$

11. درجة الاستفادة من الطاقة لمحطة التوليد المشترك للحرارة والكهرباء

$$\eta_{total} = P_{el} + Q_u / m\ q_s$$
$$= (38367 + 85309.2) / 50 \times 2915.73 = 0.848$$

3.9 تصميم محطة التدفئة وتوليد الكهرباء

بناء على الاستطاعة الحرارية الأعظمية (استطاعة التدفئة) Q_H للعنفة البخارية يتم اختيار مواصفات البخار الطازج ودرجة حرارة التحميص الوسطي عند تصميم محطة التدفئة وتوليد الكهرباء وفقاً للجدول (1.9).

الجدول 1.9: اختيار مواصفات البخار لمحطة التدفئة وتوليد الكهرباء.

استطاعة التسخين الحرارية	مواصفات البخار الطازج		مواصفات التحميص الوسطي
Q_H (MW)	t [°C]	p [bar]	t_{RH} [°C]
50	485-520	60-80	بدون تحميص وسطي
100	520-535	80-125	بدون تحميص وسطي
150	535	125-165	535
200-250	535-540	165-185	535-540
300-600	450-550	185-250	450-550

يبرِّرُ ارتفاعُ أسعار الوقود اللجوءَ إلى استخدام قيمٍ مرتفعة للبخار الطازج، فالمواصفات المنخفضة للبخار الطازج يرافقها انخفاض كمية التيار المنتج وكذلك تكاليف الاستثمار.

وبحسب مواصفات البخار الطازج يتم اختيار المسخنات الأولية لماء التسخين.

وسنصف على سبيل المثال تفاصيل محطة التدفئة وتوليد الكهرباء Reuter West في برلين.

والشكل (5.9) يبين هذا المحطة بشكل تخطيطي. أجزاؤها الأساسية هي: مولد البخار 1 مع معدات تنظيف غازات الاحتراق (جهاز سحب الآزوت a 1، المصفاة الكهربائية b 1، جهاز غَسل غازات الاحتراق وسحب الكبريت منها c 1)، المدخنة d 1، مجموعة العنفة التي يسحب البخار منها (ذات الضغط العالي والمتوسط والمنخفض 2 – b 2) مع المولد 3، جملة إعادة التبريد مع برج التبريد 4، المكثف 5، المسخنات الأولية لماء التغذية (خزان ماء التغذية/ساحب الغازات 7)، جملة نقل الحرارة 9–13.

أهم المواصفات الفنية لهذه المحطة الحرارية هي:

الاستطاعة الكهربائية الصافية الأعظمية للمحطة MW 600. الاستطاعة الحرارية الأعظمية للتسخين MW 774 وعند ذلك تبلغ الاستطاعة الكهربائية 249 MW × 2.

1. **مولد البخار**: هناك مولدان يحوي كل منهما مجرى ونصف للغازات من النوع ذي الجريان القسري والأحادي للماء في المنشأة من النوع Benson الذي يحوي مضخة تدوير عند الحمولات الصغيرة (حمولة المرجل (الغلاية) يمكن تخفيضها حتى 20 % من الاستطاعة الاسمية وتكون عادة حتى 35 %).

البخار الطازج: الاستطاعة الاسمية لتوليد البخار 961 t/h، الضغط bar196، درجة الحرارة °C540.

التحميص الوسطي البسيط: كمية البخار 817 t/h، الضغط 49 bar، درجة الحرارة 540 °C درجة حرارة دخول ماء التغذية 293 °C، مردود المولد 92 %.

2. **الاحتراق:** الوقود هو الفحم الحجري، خليط الفحم الحجري والفحم البني (75 % /25 %)، وقود سائل ثقيل (فيول أويل)، [حتى 40 % من الاستطاعة الاسمية للمرجل (الغلاية)].

تدفق الوقود 102 t/h منها 76 t/h فحم حجري و26 t/h فحم بني. كذلك يحرق الفحم المطحون (غبار الفحم): احتراق ثنائي المراحل، هناك 16 حراقاً ذا مراحل من النوع الذي تنبعث فيه غازات NO_x بكميات قليلة (Low NO_x Burners)، الحركة في الحراقات دوامية وتجري إضافة الهواء إلى الحراقات عبر توصيلات منفصلة ولها فوهات (فالات) هواء إضافية. يتم التخلص من الرماد وهو في الحالة الجافة. مقدار تشكّل NO_x عند الاحتراق أقل من 650 mg لكل m^3 من غازات الاحتراق.

3. **معدات طحن الفحم:** هناك 4 مطاحن ذات أحواض تحوي أسطوانات، استطاعة الطحن لكل منها 28 t/h. تخدم كل مطحنة 4 حراقات.

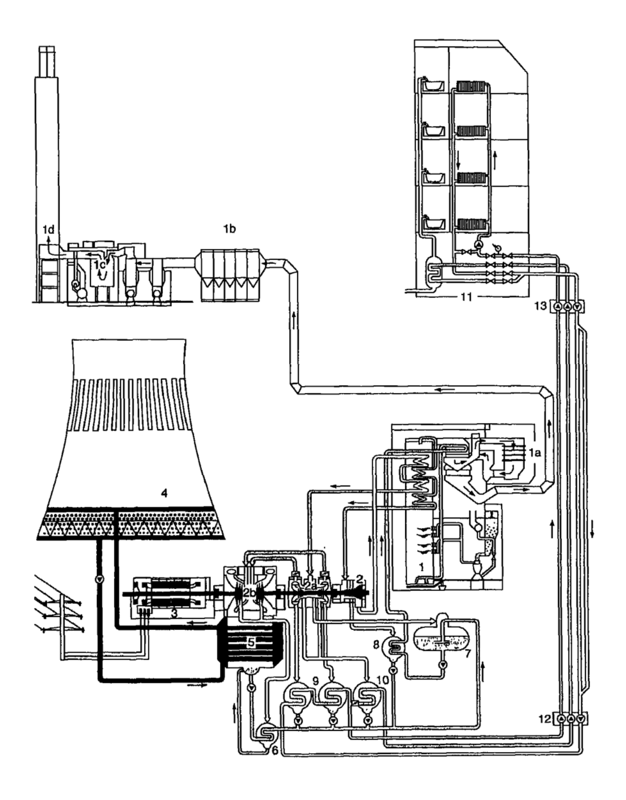
4. **العنفات، المولدات، المحولات:** هناك عنفتان، كل منهما ذات ثلاثة صناديق يسحب منها البخار لتكثيفه والاستفادة من حرارته. تعمل هذه العنفات مع تحميص وسطي بسيط، هناك عنفة أحادية الفيض ذات ضغط عالٍ (قسم الضغط العالي) وعنفتان كل منهما ثنائية الفيض إحداهما متوسطة الضغط والأخرى منخفضة الضغط.

استطاعة الوحدة (unit) الأعظمية 300 MW، سرعة الدوران 3000 min^{-1}.

المولد ثنائي الأقطاب استطاعته الاسمية 353 MVA (التوتر ــ الجهد الاسمي 22 kV) ويتم تبريده بالهيدروجين. المحول مرتبط مباشرة مع المولد (بلوك) باستطاعة اسمية 330 MVA، طرف التوتر (الجهد) العالي: 400 kV.

5. **مكثفات التسخين:** هناك اثنان لكل عنفة، استطاعة التسخين الأعظمية 387 MW × 2.

6. **جملة التغذية بالماء وإعادة التبريد:** يتم تسخين ماء التغذية في المسخنات 6–8 حتى درجة الحرارة 293 °C. يجري في خزان ماء التغذية 7 سحب الغازات من ماء التغذية. برج التبريد من النوع الرطب ذي السحب الطبيعي (ارتفاعه حوالي 100 m، قطر التضايق والقطر الأساسي (105/61 m) باستطاعة تبريد قدرها 700 MW، وتدفق تيار الماء 23000 m^3/h × 2، درجة حرارة الماء الساخن والبارد 32.1 / 19°C.



الشكل 5.9 : مخطط وصل المحطة Reuter West (في برلين) ذات عنفة سحب البخار وتكثيفه (2) ومولد البخار (1)

تؤخذ الحرارة من عنفة الضغط المتوسط عبر مكثفي تسخين 9 ومبادل حراري 10. وهكذا ترفع درجة حرارة ماء التسخين حتى 110 °C. تُركّب مضخات تدوير في مركز التدفئة البعيد 12 وفي محطة الضخ 13. يتم التوزيع عن طريق محطة مبادلة 11. قطر قناة أنابيب توزيع ونقل ماء التسخين 4.1 m.

محطة التدفئة وتوليد الكهرباء Reuter West (في برلين) مجهزة بأجهزة لتقليل إصدار الغبار والحبيبات، وتتألف معدات تنقية غازات الاحتراق لكل وحدة من جهاز سحب الآزوت 1 a، مصفاة كهربائية 1 b وجهاز لسحب الكبريت من غازات الاحتراق 1 c.

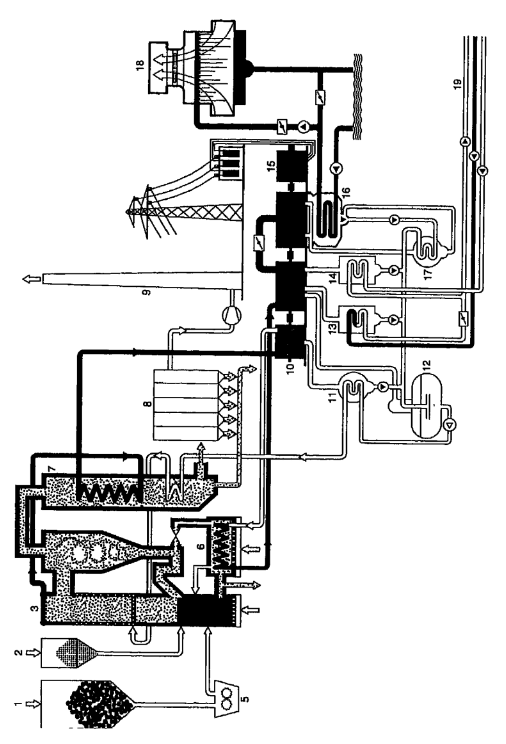
يتم سحب الآزوت من غازات الاحتراق عن طريق منشأة أفقية من النوع SCR (Selective Catalytic Reduction) ذات مجريين طويلين يشكل كل منهما جملة تحفيز 25 × 3.

تتوضع الحفّازات بين الموفر (مسخن الماء الأولي) ومسخن الهواء الأولي على طريق غازات الاحتراق. بإضافة الأمونياك كوسيط تخفيض لتواجد الآزوت في الغازات يتم فصل أكاسيد الازوت إلى آزوت وماء. وقد تمّ وصف هذه الطريقة في الفصل السادس ووسيط التخفيض هو NH_3. درجة حرارة التشغيل تتراوح بين 330 و437 °C ويصبح محتوى غازات الاحتراق من NO_x بعدئذ أقلّ من 200 mg/m^3.

أما درجة سحب الغبار في المصفاة الكهربائية فتبلغ 99.7 %.

المادة المستخدمة للامتزاز (adsorption) في منشأة سحب الكبريت من الغازات هي الحجر الكلسي والمادة الناتجة هي الجص. تبلغ درجة سحب الكبريت 85 %، أما محتوى الغاز النظيف الأعظمي من SO_2 فهو بحدود 400mg/m^3. يقسم الغاز الذي سحب الغبار منه إلى جزئين، أحدهما يمر في غاسل متساوي الاتجاه ومتعاكس الاتجاه.

يتم رش مزيج معلق (Suspension) من الحجر الكلسي (المحلول بالماء) فينشأ مزيج معلق جديد هو الجص، الذي يتألف من أوكسيد الكبريت والحجر الكلسي، يُطرح من مستنقع الغسل عن طريق مضخات خاصة ثم تتم تصفيته وسحب الماء منه بحيث تبقى نسبة الرطوبة فيه 10 % بواسطة فرازات بالطرد المركزي (Centrifuge). التدفقات الكتلية الوسطية هي مسحوق الحجر الكلسي (كالطحين) 4050 kg/h، حمض النمل 22 kg/h، الجص 6200 kg/h، المياه المستهلكة (المالحة) 9.5 m^3/h.



الشكل 6.9 : مخطط محطة التدفئة وتوليد الكهرباء Moabit في برلين ذات الفرشة الدوامية الاسترجاعية.

1 صومعة فحم، 2 صومعة الحجر الكلسي، 3 حجرة احتراق، 4 فرازة استرجاع، 5 منشأة تكسير، 6 مبادل حراري دوامي، 7 سطوح تسخين إضافية، 8 مصفاة غبار، 9 مدخنة، 10 علفة، 11 مسخن أولي ذو ضغط عالٍ، 12 خزان ماء التغذية للمرجل، 13 جهاز تأمين ماء ساخن، 14 مكثف تسخين، 15 مولد كهربائي، 16 مكثف رئيسي، 17 مسخن أولي ذو ضغط منخفض، 18 برج تبريد، 19 أنابيب نقل الحرارة (شبكة التوزيع)

يُسخَّن الغاز النظيف في حجرة احتراق تحرق الوقود السائل ثم تساق إلى المدخنة. تتألف منشأة الـــمدخنة في المحطة الحرارية Reuter West (برلين) من أنبوبين فولاذيين لتصريف الغازات (القطر 4.75 m، الارتفاع 122 m) في محور إسمنتي (قطره 13 m، ارتفاعه 104 m).

لمحطات التدفئة وتوليد الكهرباء في نفس الوقت مقارنة بالمحطات الكهربائية ذوات عنفات التكاثف المزايا التالية: يبلغ المردود الكهربائي عند توليد التيار الكهربائي فقط في المحطات الكهربائية ذوات عنفات التكاثف 38 % والضياعات مع ماء التبريد 54 % والضياعات مع غازات الاحتراق 8 % من الطاقة الحرارية القادمة مع تيار الوقود. أما عند توليد الحرارة والتيار الكهربائي في نفس الوقت في محطة التدفئة وتوليد الكهرباء فيبلغ المردود الكهربائي 31 % ولكن هناك ربحاً في الطاقة المفيدة عن طريق حرارة التسخين مقداره 49 %، فالمردود الإجمالي يصل إلى 80 %. تبلغ الضياعات الحرارية 20 % (مع ماء التبريد 12 % ومع غازات الاحتراق 8 %) وبهذا تُوفَّر طاقة أولية ويقلّ انبعاث الغازات الضارة.

محطات التدفئة وتوليد الكهرباء ذات مولدات البخار الدوامية (fluidized bed)

تعمل محطة Moabit في برلين منذ عام 1991، وهي محطة تدفئة وتوليد للكهرباء مزودة بفرشة وقود دوامية دوارة (استرجاعية). تتألف وحدة التوليد (unit) التي استطاعتها الحرارية 240 MW من مرجل بنسون ذي الانسياب الوحيد والقسري للماء في الدورة، ومن عنفة بخارية ومولد. يتضمن مولد البخار فرشة وقود دوامية استرجاعية (مقطعها 7.5 m × 7.5 m وارتفاعها 32 m) وفرازتين (سلكون) ومبرداً ذا سير نقال وسطوح تسخين أخرى (محمصاً، محمصاً وسطياً، موفراً، مسخن هواء أولي). يبلغ التحمل السطحي لحجرة الاحتراق الدوامية 4.3 MW/m^2 والتحميل الحجمي لها 0.13 MW/m^3. سطوح تسخين المبخر على شكل أنابيب جدارية مبردة بالماء (ممبرانية أو غشائية) وكذلك الأمر للمبرد وللفرازتين. يسخن الماء تسخيناً أولياً حتى درجة الحرارة 300 °C.

يبين الشكل (6.9) مخطط عمل محطة التدفئة وتوليد الكهرباء ذات الطبقة الدوامية Moabit. يضاف إلى حجرة الاحتراق خليط من 39 % فحم حجري و 44 % فحم بني و13 % رماد طيار و 4 % حجر كلسي. تبلغ القيمة الحرارية الوسطية للخليط 24.4 MJ/kg.

يتعرض الهواء للتسخين الأولي في مسخن مُركَّب خلف المصفاة الكهربائية، ويضاف الهواء الأولي والثانوي وكذلك الوقود والحجر الكلسي والرماد المسترجع من الفرازات والمبردات إلى

النصف السفلي من حجرة الاحتراق. يُرسَل الهواء الأولي بسرعة 7 m/s فوق الأرضية المثقبة وتصل نسبة إتمام الاحتراق للفحم إلى ما يزيد على 99 %.

تُفصَل المواد الصلبة من غـــازات الاحتراق عن طريق فرازتين موصولتين على التوازي (القطر 7.3 m الطول الإجمالي 15 m). يجري سحب الغبار من غازات الاحتراق في المصفاة الكهربائية عند درجة الحرارة 320 °C. تبلغ الانبعاثات القيم التالية (بواحدة mg في الـــ m^3 عند الشروط النظامية): المحتوى من الغبار 20، SO_2: 200، NO_2: 200، CO: 250.

كما يمكن في محطات التدفئة وتوليد الكهرباء استخدام مولدات بخار ذات فرشة دوامية مضغوطة، وهي تتمتع بالمزايا التالية: بناؤها المدمج (Compact) وعامل انتقالها الحراري المرتفع واكتمال احتراق الوقود ودرجة سحب الكبريت المرتفعة ومحتوى غازات الاحتراق المنخفض من NO_x، أما مساوئها فهي انخفاض مردود العملية. تتم عملية الضغط في هذه الطريقة بواسطة ضاغط وحيد المرحلة، وعنفة غازية، حيث يرتفع الضغط إلى 6 bar ويستفاد من حرارة الغازات في توليد البخار وقد بينت الحسابات تحسناً في مردود العملية بمجملها.

4.9 مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء اللامركزية

1.4.9 مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء اللامركزية التي تستخدم محركات الاحتراق الداخلي

> **!** *مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء اللامركزية هي محطة توليد طاقة تقوم بالإنتاج المشترك للكهرباء والحرارة لتأمين متطلبات محلية (لا مركزية). تستخدم في هذه المحطات محركات الاحتراق الداخلي أو العنفات الغازية من أجل التوليد المتزامن (بنفس الوقت)للتيار الكهربائي والحرارة (ربما البرودة أيضاً).*

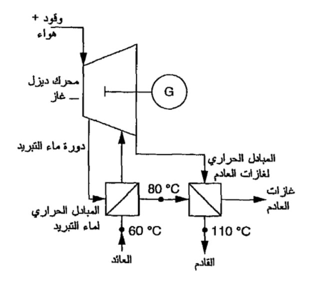
تتحول في المجموعات التي تعتمد على محركات الاحتراق الداخلي الطاقة الكيمائية المخزنة في الوقود الغازي أو السائل إلى طاقة حرارية وميكانيكية مفيدة.

ومبدأ هذه المجموعة مبين في الشكل (7.9).

وتستخدم لهذا الغرض محركات الديزل أو المحركات الغازية أو محركات الديزل ـــ الغاز.

تتألف المجموعة ذات المحرك من جملة محرك ـــ مولد ومبادلين حراريين أو ثلاثة لاستغلال حرارة غازات الاحتراق (العادم). تتراوح الاستطاعة الكهربائية للمجموعة ذات المحرك P_{el} بين 40 kW و 8 MW والاستطاعة الحرراية Q_{H} بين 80 kW و9 MW.

يبلغ مردود الاستفادة من الطاقة 75 حتى 90 %.



الشكل 7.9 : مبدأ عمل مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء التي تستخدم محرك الاحتراق الداخلي.

يُستخدم في هذه المجموعات الغاز الطبيعي، وقود الديزل (المازوت)، غاز المولدات، غاز فحم الكوك، غاز شبكة المدينة بالإضافة إلى الغاز المستخرج من مطامر القمامة أو محطات معالجة مياه المجاري، كما يستخدم الوقود السائل الخفيف أو الثقيل. وخلافاً لمحطات الطاقة البخارية التي تولد كهرباءً بمردود 38 % فإن المجموعات التي تستخدم محركات الاحتراق الداخلي يصل تحويل الطاقة الأولية فيها إلى تيار كهربائي وحرارة إلى القيمة 90 %، منها 30 % طاقة كهربائية و60 % حرارة قابلة للاستخدام، وبالتالي فإن استخدام مثل هذه المجموعات يساهم في توفير الطاقة وحماية البيئة.

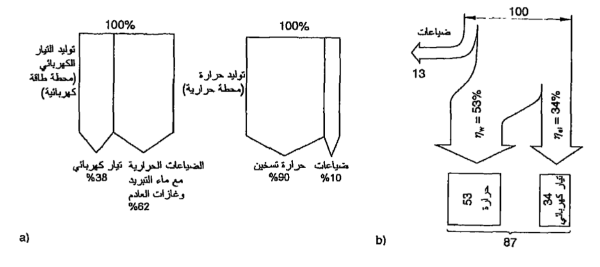
تُحوَّل الحرارة الضائعة مع غازات احتراق المحرك وكذلك مع ماء التبريد أو زيت التشحيم إلى حرارة مفيدة لماء التسخين.

تُعرَّف نسبة الاستطاعة الكهربائية P_{el} إلى الاستطاعة الحرارية Q_{th} بـــ "الرقم المميز للتيار الكهربائي"، ووفقاً للوقود المســـتخدم ولتصميم جملـــة المحرك ـــ المولـــد فإن قيمة σ يمكن أن تصل حتى 1.

على سبيل المثال يتراوح استهلاك الطاقة الأولية (غاز طبيعي قيمته الحرارية الدنيا LCV حوالي 33 MJ/m³) بين 148 و392 kJ/s وذلك في مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء ذات الاستطاعة الكهربائية P_{el} المتراوحة بين 45 و115 kW وذات الاستطاعة الحرارية المتراوحة بين 85 و 210 kW. وتبلغ درجة الاستفادة من الطاقة حوالي 90 %.

يبين الشكل (8.9) مقارنة بين عملية التوليد المشترك للتيار الكهربائي وحرارة التسخين (التدفئة) في مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء وبين التوليد المنفصل للطاقة الكهربائية (في محطة الطاقة الكهربائية) والطاقة الحرارية (في محطة طاقة حرارية).

من أجل توفير الحرارة بشكل مضمون لبعض المشاريع (الأبنية السكنية، أبنية المعامل والمكاتب، المشافي، المسابح) يضاف مرجل ليعمل عند حمولة الذروة، يحرق الغاز أو الوقود السائل.



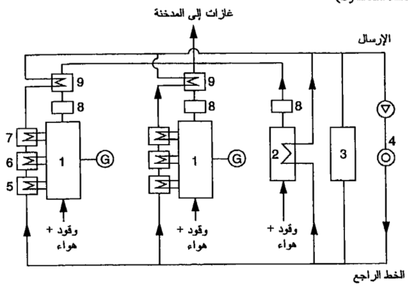
الشكل 8.9 : مخطط Sankey (إضافة الحرارة وتحويلها) لـــ: (a) توليد منفصل للتيار الكهربائي في محطة الطاقة البخارية (لتوليد الكهرباء) ولحرارة التسخين في محطة التدفئة (التسخين) (b) التوليد المشترك للكهرباء وللحرارة في مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء.

يؤدي استخدام محرك يعمل على وقودين (غاز ــــ ديزل) وحراق يحرق وقودين لمرجل حمولة الذروة إلى رفع جاهزية واقتصادية المنشأة بمجملها. تُعرَّف الجاهزية بأنها قابلية المنشأة لتوليد الطاقة، وتميزها القيم التالية: الجاهزية الزمنية وجاهزية الاستطاعة والجاهزية للعمل. الجاهزية الزمنية مثلاً هي النسبة بين مجموع أزمنة التشغيل مع أزمنة الجاهزية وبين الزمن الكلي للفترة المعتبرة أما

الجاهزية للعمل فهي نسبة العمل المتاح (أي الفرق بين العمل الاسمي والعمل غير المتاح) إلى العمل الاسمي.

يبين الشكل (9.9) مخطط التسلسل في مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء المؤلفة من مجموعتي محرك ــ مولد مع المبادلات الحرارية الموافقة بالإضافة إلى مرجل حمولة الذروة.

يجري توزيع الحرارة على المستهلكين المختلفين عن طريق محطة توزيع الحرارة المجهزة بمضخات تدوير في الشبكة وموزعات باتجاه التيار (المرسلات) ومجمعات التيار العائد والعدادات الحرارية، بالإضافة إلى أجهزة التحكم. تنظم درجة حرارة الإرسال وفقاً لدرجة حرارة الوسط الخارجي. (الحرارة المحيطية). تستخدم في مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء المولدات المتوافقة (المتزامنة) أو غير المتزامنة (Synchronous, asynchronous).



1. محرك ديزل - غاز
2. مرجل حملة الذروة
3. مخزن للحرارة (مدخرة حرارية)
4. مستهلك للحرارة
5. مبادل حراري لماء التبريد
6. مبادل حراري لزيت التزليق (التشحيم)
7. مبرد هواء الشحنة الجديدة
8. حفاز لسحب NOx
9. مبادل حراري لغازات الاحتراق (العادم)

الشكل 9.9 : تسلسل العمليات في مجموعة التدفئة والتسخين ذات مجموعتي المحرك ــ المولد ومرجل حمولة الذروة.

2.4.9 كفاءة (فعالية) محركات الاحتراق الداخلي في مجموعات التدفئة وتوليد الكهرباء

دورة عمل المحرك الغازي (محرك البنـــزين)

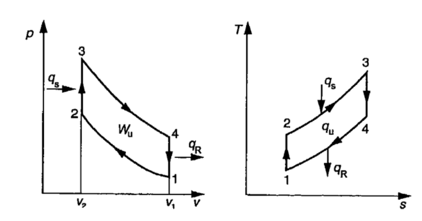
تتألف دورة عمل محركات الاحتراق الداخلي من انضغاط ايزنتروبي ولإضافة للحرارة بثبوت الحجم أو الضغط، و تمدد ايزنتروبي وطرح للحرارة بثبوت الحجم. يعتبر الهواء وسيط العمل

لعمليات المقارنة بين محركات الاحتراق الداخلي، كما يعتبر غازاً مثالياً بأس الايزنتروبي قدره $k = 1.4$ وثابت الغاز له $R = 0.287$ kJ/kg K. السعة الحرارية النوعية بثبوت الحجم $c_V = 0.718$ kJ/kg K وبثبوت الضغط $c_P = 1.005$ kJ/kg K.

عملية المقارنة المناسبة للمحركات الغازية هي دورة أوتو (Otto)، التي تتألف من:

- انضغاط ايزنتروبي 1–2 يستهلك عملاً،
- إضافة للحرارة بثبوت الحجم 2–3،
- تمدد ايزنتروبي 3–4 يقدم عملاً،
- طرح للحرارة بثبوت الحجم 4–1.

ويبين الشكل (10.9) دورة أوتو في مخططي p,v و-T,s.



الشكل 10.9 : دورة عمل أوتو على المخططين p-v و T-s.

تتميز دورة العمل بنسبة الانضغاط

$$\varepsilon = v_1 / v_2 \tag{14.9}$$

العلاقة بين القيم المميزة للحالة (الحجم النوعي v، الضغط p، درجة الحرارة T) لوسيط العمل الذي هو الهواء وذلك في دورة عمل أوتو مبينة في الجدول (2.9).

تحسب كميات الحرارة لدورة أوتو من العلاقات التالية.

من أجل الحرارة المضافة بثبوت الحجم ($v = \text{const}$):

$$Q_S = m\, c_V (T_3 - T_2) \quad [\text{kJ}] \tag{15.9}$$

حيث: c_V يبلغ kJ/kg K 0.718 وهي السعة الحرارية النوعية بثبوت الحجم للهواء.

الجدول 2.9: العلاقات بين القيم المميزة للحالة v، p، T في دورة عمل أوتو (Otto).

تغير الحالة	v	p	T
انضغاط ايزنتروبي 1–2 (s = const)	$v_2 = v_1 / \varepsilon$	$p_2 / p_1 = \varepsilon^k$	$T_2 / T_1 = \varepsilon^{(k-1)} = (p_2 / p_1)^{k-1/k}$
إضافة الحرارة بثبوت الحجم (v = const) 2–3	$v_3 = v_2$	$p = R\,T / V$	$T_3 / T_2 = P_3 / P_2$
تمدد ايزنتروبي 3–4 (s = const)	$v_4 = v_1$	$p_4 / p_3 = 1 / \varepsilon^k$	$T_4 / T_3 = 1 / \varepsilon^{(k-1)} = (p_4 / p_3)^{k-1/k}$
طرح الحرارة بثبوت الحجم (v = const) 4–1	$v_4 = v_1$	$p_4 / p_1 = T_4 / T_1$	

ومن أجل الحرارة المطروحة (عند v = const):

$$Q_R = m\, c_V (T_4 - T_1) \quad [kJ] \qquad (16.9)$$

ينتج عمل الانضغاط بين p_1 وp_2 [kPa] من أجل أس إيزنتروبي $k = 1.4$ كما يلي:

$$W_{comp} = (p_2 V_2 - p_1 V_1) / (k - 1)$$

$$= m\, R\, (T_2 - T_1) / (k - 1) \quad [kJ] \qquad (17.9)$$

ينتج عمل التمدد بين p_3 وp_4 [kPa] كما يلي:

$$W_{exp} = (p_3 V_3 - p_4 V_4) / (k - 1)$$

$$= m\, R\, (T_3 - T_4) / (k - 1) \quad [kJ] \qquad (18.9)$$

ويصبح العمل المفيد لدورة العمل:

$$W_u = W_{exp} - W_{comp} = Q_S - Q_R \quad [kJ] \qquad (19.9)$$

والمردود الحراري لدورة عمل أوتو:

$$\eta_{th} = W_u / Q_S = 1 - Q_R / Q_S = 1 - 1 / \varepsilon^{k-1} \qquad (20.9)$$

كلما ارتفعت نسبة الانضغاط ε كلما ازداد المردود الحراري η_{th} (الجدول 3.9).

الجدول 3.9: المردود الحراري η_{th} لدورة عمل أوتو وعلاقته بنسبة الانضغاط ε وأس الايزنتروبي k = 1.4.

نسبة الانضغاط ε	3	6	9	12
المردود الحراري η_{th}	0.36	0.51	0.58	0.63

دورة عمل محرك الديزل Diesel

عملية المقارنة المستخدمة لمحركات الديزل هي دورة عمل "ديزل" التي تتألف من:

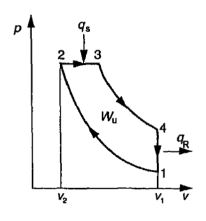
- انضغاط ايزنتروبي 1–2 يستهلك عملاً،
- إضافة للحرارة بثبوت الضغط 2–3،
- تمدد ايزونتروبي 3–4 يقدم عملاً،
- طرح للحرارة بثبوت الحجم 4–1.

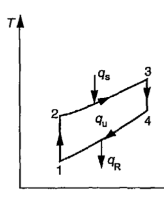
يبين الشكل (11.9) دورة عمل ديزل على المخططين p-v وT-s

تتميز دورة ديزل بنسبة الانضغاط ε ونسبة الحقن φ:

$$\varphi = v_3 / v_2 \quad \text{و} \quad \varepsilon = v_1 / v_2 \qquad (21.9)$$

يُضغَط الهواء (وليس خليط الهواء والوقود كما هو الحال في دورة أوتو)، وتكون نسبة الانضغاط ε أكبر بكثير منها في دورة أوتو.





الشكل 11.9 : دورة عمل ديزل على المخططين p,v و T-s.

تنطبق المعادلتان (16.9) و (17.9) المستخدمتان في دورة أوتو أيضاً على دورة ديزل في حساب الحرارة المطروحة Q_R أو عمل الانضغاط W_{comp}.

تُحسب الحرارة المضافة (عند $p = const$) في دورة ديزل كما يلي:

$$Q_S = m\, c_p\, (T_3 - T_2) \quad [kJ] \qquad (22.9)$$

حيث: c_p السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط للهواء ($c_p = 1.005$ kJ/kgK).

أما عمل التمدد في دورة ديزل فيحسب كما يلي:

$$W_{exp} = p_2\,(v_3 - v_2) + (p_3\, v_3 - p_4\, v_4) / (k - 1)$$

$$= m\, R\, [(T_3 - T_2) + (T_3 - T_4)] / (k - 1) \quad [kJ] \qquad (23.9)$$

حيث: p_2 و p_3 و p_4 بالـ [kPa]

k أس الايزنتروبي وقيمته 1.4.

المردود الحراري لدورة عمل ديزل:

$$\eta_{th} = W_u / Q_S = 1 - Q_R / Q_S = 1 - (\varphi^k - 1) / k (\varphi - 1) \varepsilon^{k-1} \quad (24.9)$$

يـــزداد المردود الحراري η_{th} لدورة عمل ديزل مع ازدياد نسبة الانضغاط ε وانخفاض نسبة الحقن φ.

وبازدياد الحمولة تزداد قيمة φ. يبين الجدول (4.9) تأثير φ على المردود الحراري η_{th} لدورة ديزل.

الجدول 4.9: المردود الحراري لـــدورة عمل ديزل وارتباطه بنسبة الحقـــن φ ونسبة الانضغاط $\varepsilon = 14$ ونسبة الضغوط $p_2/p_1 = 40.2$، أس الايزنتروبي $k = 1.4$ من أجل $\varphi = 1$ أي دورة أوتو فإن $\eta_{th} = 0.65$.

نسبة الحقن φ	2	3	4	5
المردود الحراري η_{th}	0.59	0.55	0.51	0.47

المردود الفعلي (الفعال)

المردود الفعلي لمحرك احتراق داخلي هو نسبة الاستطاعة الميكانيكية المفيدة للمحرك P_e إلى تيار الحرارة المضافة مع الوقود Q_F.

$$\eta_e = P_e / Q_F \quad (25.9)$$

وكذلك:

$$\eta_e = \eta_{th}\, \eta_g\, \eta_m = \eta_i\, \eta_m \quad (26.9)$$

يُحسب المردود الحراري η_{th} بدلالة الاستطاعة النظرية للمحرك كما يلي:

$$\eta_{th} = P_{th} / Q_F \quad (27.9)$$

ودرجة الجودة η_{good} هي نسبة الاستطاعة الدليلية للمحرك P_i إلى الاستطاعة النظرية:

$$\eta_{good} = P_i / P_{th} \quad (28.9)$$

أما المردود الدليلي:

$$\eta_i = P_i / Q_F \quad (29.9)$$

والمردود الميكانيكي:

$$\eta_m = P_e / P_i \tag{30.9}$$

الاستطاعة الميكانيكية

تُحسب الاستطاعة الدليلية للمحرك كما يلي:

$$P_i = V_S\, p_i\, n / u \quad [\text{kW}] \tag{31.9}$$

حيث: V_S حجم الإزاحة للمحرك [m^3]

p_i الضغط الدليلي [kPa]

n سرعة الدوران [min^{-1}]

u 120 للمحركات الرباعية الأشواط، و 60 للمحركات الثنائية الأشواط.

الاستهلاك النوعي للوقود

يحسب الاستهلاك النوعي للوقود في محرك الاحتراق الداخلي كما يلي:

$$Scf_e = 3.6 \times 10^6\, m_F / P_e = 10^3 / \eta_e\, \text{LCV} \quad [\text{g/kWh}] \tag{32.9}$$

حيث: m_F استهلاك الوقود [kg/s]

LCV القيمة الحرارية الدنيا للوقود [kWh/kg].

من أجل محركات أوتو أو ديزل يمكن اعتماد القيم الاسترشادية التالية:

- نسبة الانضغاط ε في محركات أوتو تتراوح بين 7 و11 وفي محركات ديزل 14–24،
- نسبة الضغط P_2/P_1 لمحركات أوتو تتراوح بين 10 و 15 وفي محركات ديزل 24–50،
- درجة الجودة $\eta_{good} = 0.7 - 0.9$،
- المردود الميكانيكي لمحركات أوتو 0.8 إلى 0.9 ولمحركات ديزل 0.75 –0.85،
- المردود الفعال لمحركات أوتو 0.2 إلى 0.3 ولمحركات ديزل 0.27 –0.36،
- الاستهلاك النـــوعي للوقود لمحركات أتو Scf_e يبلغ 250 إلى 380 ولمحركات ديزل 240 حتى 290 g/kWh.

مثال 2.9

محرك ديزل رباعي الأشواط يتمتع بالمواصفات التالية: حجم الإزاحة V_S = 5.71 l، نسبة الانضغاط $\varepsilon = 17$، سرعة الدوران $n = 3000\ min^{-1}$، الضغط الدليلي $p_i = 1000$ kPa.

ما هي قيمة الاستطاعة الدليلية والفعالة وكذلك المردود الفعال للمحرك إذا كان الاستهلاك النوعي للوقود [g/Kwh] 240 (القيمة الحرارية الدنيا لوقود الديزل LCV = 11.67 kWh/kg) المردود الميكانيكي $\eta_m = 0.85$؟

الحل

الاستطاعة الدليلية للمحرك:

$$P_i = V_S\ p_i\ n / u$$
$$= 5.75 \times 10^{-3}\ m^3 \times 1000kPa \times 3000min^{-1} / 120$$
$$= 143.75\ kW$$

الاستطاعة الفعالة للمحرك:

$$P_e = P_i\ \eta_m$$
$$= 143.75\ kW \times 0.85 = 122.2\ kW$$

وينتج الآن المردود الفعال:

$$\eta_e = 10^3 / Scf_e\ LCV$$
$$= 10^3 / 240\ g/kWh \times 11.67kWh/kg = 0.357$$

3.4.9 الموازنة الحرارية واستهلاك الوقود لمجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء

الموازنة الحرارية لمجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء تكتب كما يلي (كل الحدود بالـ kW)

$$Q_F = P_{el} + Q_H + Q_{LOS} \qquad (33.9)$$

حيث: Q_F تدفق الحرارة المنطلقة من الوقود

P_{el} الاستطاعة الكهربائية

Q_H الاستطاعة الحرارية المأخوذة من المجموعة

Q_{los} تدفق الحرارة الضائعة.

يحسب التيار الحراري المرسل مع الوقود كما يلي:

$$Q_F = m_F\ LCV\ \eta_{TPS} \quad [kW] \qquad (34.9)$$

حيث: m_F استهلاك الوقود [kg/s]

LCV القيمة الحرارية الدنيا للوقود [kJ/kg]

η_{TPS} مردود مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء.

استهلاك الوقود (الوقود الغازي، السائل الخفيف، وقود الديزل) في مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء يُحسَب كما يلي:

$$m_F = Q_F / (\eta_{TPS} \text{LCV}) \quad [kg/s] \text{ أو } [m^3/s] \tag{35.9}$$

يتم أخذ الحرارة في المبادلات الحرارية المتصلة بماء التبريد وبغازات الاحتراق (العادم)، ولذلك تتألف الاستطاعة الحرارية المفيدة لمجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء من:

$$Q_H = Q_{CW} + Q_G \quad [kJ/s] \tag{36.9}$$

حيث: Q_{CW} الاستطاعة الحرارية لمبادل ماء التبريد [kW]

Q_G الاستطاعة الحرارية لمبادل غازات الاحتراق [kW].

تُحسَب هاتان الاستطاعتان بالاعتماد على التدفق الكتلي لماء التسخين m_{HW}[kg/s] والسعة الحرارية النوعية للماء $C_{P,W}$ (4.187 kJ/kgK) وعلى ارتفاع درجة الحرارة لماء التسخين إمّا في مبادل ماء التبريد Δt_{cw} [K] أو في مبادلات غازات الاحتراق Δt_G [K].

$$Q_{cw} = m_{HW}\, c_{PW}\, \Delta t_{CW} \tag{37.9}$$

$$Q_G = m_{HW}\, c_{PW}\, \Delta t_G \tag{38.9}$$

التدفق الإجمالي للحرارة المفيدة في مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء يصبح:

$$Q_H = m_{HW}\, c_{PW}\, (t_1 - t_2) \quad [kJ/s] \tag{39.9}$$

حيث: t_1 درجة حرارة الماء الساخن الذاهب

t_2 درجة حرارة الماء الساخن العائد (الراجع).

أما الموازنة الحرارية لمبادل غازات الاحتراق فهي:

$$Q_G = m_G\, c_{PG}\, \Delta t_G = m_{HW}\, c_{PW}\, \Delta t_{HW} \quad [kW] \tag{40.9}$$

حيث: m_G التدفق الكتلي لغازات الاحتراق [kg/s]

$C_{P.G}$ السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط لغازات الاحتراق [kJ/kgK]

Δt_G فرق درجات الحرارة في مبادل غازات الاحتراق [K]

Δt_{HW} ارتفاع درجة حرارة ماء التسخين في مبادل غازات الاحتراق [K].

تُحسب درجة حرارة غازات الاحتراق عند مخرج مبادل الغازات كما يلي:

$$t_{G,exit} = t_{G,ent} - Q_G / (m_F V_G c_{P,G}) \quad (41.9)$$

حيث: $T_{G,ent}$ درجة حرارة الغازات عند مدخل مبادل الغازات [°C]

V_G كمية الغازات الناتجة [m^3 لكل kg أو m^3 لكل m^3 من استهلاك الوقود] (تحسب هذه القيمة من حسابات الاحتراق، انظر الفصل الثاني)

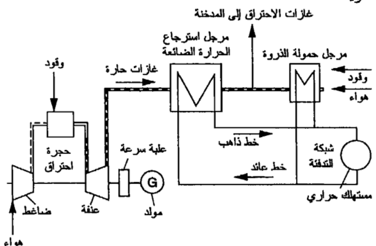
$C_{P,G}$ السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط لغازات الاحتراق [kJ/kgK].

تُصمَّم محطات التدفئة وتوليد الكهرباء عادة بحسب الاستهلاك الحراري اللازم، أما التيار الكهربائي المولّد فيفضل أن يستخدم بشكل كامل ما أمكن في الأبنية التي تتم تدفئتها.

5.9 محطات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة التي تستخدم العنفات الغازية

محطات التدفئة وتوليد الكهرباء اللامركزية ذات العنفات الغازية

تقسم في هذه المحطات الاستطاعة التي تولدها العنفة الغازية إلى الاستطاعة المفيدة للمولد الكهربائي وإلى الاستطاعة المقدمة لتشغيل الضاغط، كما يستفاد من حرارة غازات الاحتراق المغادرة للعنفة في مرجل لاستعادة (استرجاع) الحرارة الضائعة لتسخين ماء التدفئة المستخدم للتدفئة القريبة أو البعيدة عن موقع المحطة. لقد تمّ في الفصل السابع استعراض التحليل الترموديناميكي لدورة عمل العنفة الغازية.



الشكل 12.9 : مخطط عمل محطة التدفئة وتوليد الكهرباء اللامركزية ذات العنفة الغازية.

أما تركيب محطة التدفئة وتوليد الكهرباء ذات العنفة الغازية فهو مبين بشكل تخطيطي في الشكل (12.9). يتم أخذ حرارة التدفئة عن طريق مرجل استرجاع الحرارة الضائعة.

الاستطاعة الحرارية المأخوذة:

$$Q_H = m_{HW}\, c_{PW}\, \Delta t_{HW} \qquad (42.9)$$

سنعرض على سبيل المثال محطة التدفئة وتوليد الكهرباء Köpenick في برلين، وهي تتألف من عنفتين غازيتين ومرجلين لاسترجاع الحرارة الضائعة وثلاثة مراجل لحمولات الذروة. يضمن التحضير المتعدد المراحل للماء الدافئ بالإضافة إلى التدوير الدائم الوصول إلى درجة الحرارة 55 °C، ويتم بذلك في نفس الوقت تبريد الخط الراجع لماء التسخين.

المواصفات الفنية لكل من وحدتي محطة التدفئة وتوليد الكهرباء في Köpenick معطاة في الجدول (5.9).

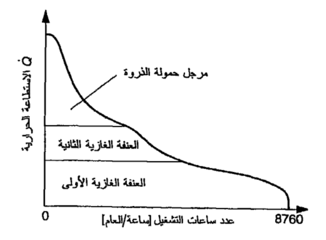
الجدول 5.9: المواصفات الفنية لمحطة التدفئة وتوليد الكهرباء اللامركزية في Köpenick (برلين).

الجهاز	المواصفات الفنية
1. العنفة الغازية	
نوعها Solor Taurus 7000	ثلاثية المراحل
سرعة الدوران	14950 min^{-1}
درجة حرارة الغازات المغادرة للعنفة	حوالي 480 °C
2. الضاغط	يحوي 12 مرحلة
3. حجرة الاحتراق	حجرة احتراق حلقية ذات 12 فوهة (فتحة)
الوقود	غاز طبيعي، الوقود السائل الخفيف (المازوت)
4. المولد الكهربائي	
الاستطاعة الكهربائية P_{el}	5.3 MW
سرعة الدوران	1500 min^{-1}
5. مرجل استرجاع الحرارة الضائعة	
استطاعته الحرارية	9.3 MW
درجة حرارة الغازات المغادرة	حوالي 110°C
6. مرجل حمولات الذروة عدد (3)	
الاستطاعة الحرارية	9.3 MW
درجة حرارة الغازات المغادرة	حوالي 110°C
نوع الوقود	غاز طبيعي، وقود سائل خفيف (مازوت)

في شبكة لتوزيع الحرارة ثنائية الخطوط طول تمديداتها 10.1 km وقطر أنابيبها 0.5 m تنظم درجة الحرارة للخط الذاهب بشكل متقلب من 80 حتى 135 °C.

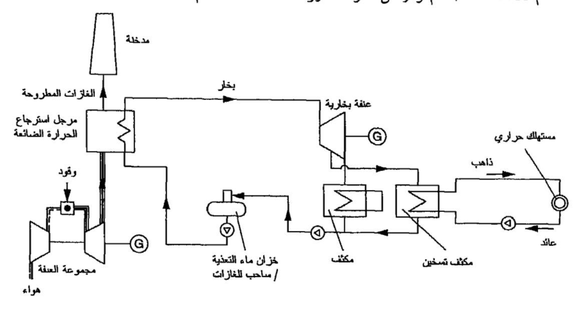
وهناك 83 محطة تبادل حراري استطاعتها الحرارية 60 MW.

بلغت الكلفة الإجمالية لمحطة التدفئة وتوليد الكهرباء Köpenick 26 مليون مارك ألماني.



الشكل 13.9 : تغطية الاستهلاك الحراري في محطة التدفئة وتوليد الكهرباء ومرجل حمولة الذروة (وتوضُّعها على منحني التحميل السنوي).

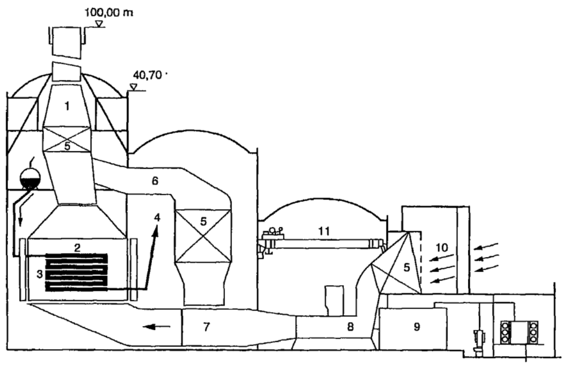
يبين الشكل (13.9) منحني التحميل السنوي لغرض التدفئة، وكذلك مجالات تشغيل العنفات الغازية ومرجل حمولة الذروة. ويتضح أن العنفة الأولى تستخدم 6200 ساعة في العام والثانية تستخدم 5000 ساعة/العام ومرجل حمولة الذروة 3500 ساعة/العام.



الشكل 14.9 : المحطة المشتركة (الدارة المركبة) لتوليد الكهرباء والحرارة.

محطة التدفئة وتوليد الكهرباء ذات العنفة الغازية

يبين الشكل (14.9) محطة مشتركة لتزويد المشتركين بالكهرباء والحرارة بشكل تخطيطي. تتألف هذه المحطة المشتركة (الدارة المركبة) من المجموعات التالية: مجموعة العنفة، مرجل استرجاع الحرارة الضائعة، العنفة البخارية ذات الضغط المقابل (الخلفي) مع المولد. تستخدم أولاً الغازات الساخنة المغادرة للعنفة الغازية لتوليد البخار في مرجل استرجاع الحرارة الضائعة، ثم يتمدد البخار المتولد في عنفة الضغط المقابل حتى مستوى الضغط المطلوب لتسخين ماء التدفئة. ترتيب وتوضُّع أجزاء هذه المنشأة أي العنفة الغازية ومرجل استرجاع الحرارة الضائعة مبين على الشكل (15.9).



1 مدخنة
2. مرجل استرجاع الحرارة الضائعة
3. مولد البخار
4. بخار إلى العنفة البخارية
5. مخمد صوت (كاتم صوت)
6. مجرى جانبي
7. مجرى لغازات الاحتراق
8. عنفة غازية
9. مولد كهربائي
10. مدخل الهواء مع مصفاة للهواء
11. رافعة

الشكل 15.9 : توضع مركبات العنفة الغازية مع مرجل الحرارة الضائعة في منشأة مشتركة لتوليد التدفئة.

يجري تسخين ماء التدفئة بالدرجة الأولى في مسخنات ماء التغذية بواسطة البخار المنفلت من العنفة البخارية، كما تستخدم حرارة مرجل استرجاع الحرارة الضائعة لهذا الغرض. تزوَّد المنشأة

عادةً بمرجل حمولة الذروة الذي يؤمن الحرارة اللازمة عند درجات الحرارة الخارجية المنخفضة جداً.

يتميز هذا النوع من المنشآت بالكسب الكبير للكهرباء والاستغلال الجيد للوقود.

6.9 وفر الطاقة واقتصادية استخدام منشأة التدفئة وتوليد الكهرباء

يبين الشكل (4.9) مقارنةً بين توزع الطاقة في محطة توليد الكهرباء ذات عنفة التكاثف وتوزع الطاقة في محطة توليد مشتركٌ للكهرباء وللحرارة. عند استخدام النوع الثاني يتحقق وفر في الطاقة. إنّ استهلاك الطاقة في منشأة التدفئة وتوليد الكهرباء أقل من مجموع الاستهلاك في محطة توليد الكهرباء البخارية ومحطة التدفئة عند توليد نفس الكميات من الكهرباء والحرارة في المنشأتين.

يُحسَب الوفر الذي يمكن الحصول عليه في استهلاك الوقود لمنشأة بالتدفئة وتوليد الكهرباء مقارنة بعملية التوليد المنفصل للكهرباء والحرارة كما يلي:

$$\Delta m = m_{\text{separate}} - m_{\text{TPS}} \quad [\text{kg/s} \text{ أو } m^3/\text{s}] \tag{43.9}$$

حيث: m_{separate} استهلاك الوقود عند التوليد المنفصل للكهرباء والحرارة

m_{TPS} استهلاك الوقود في منشأة التدفئة وتوليد الكهرباء.

مثال 3.9

ما هو الوفر في الطاقة الأولية لمنشأة التدفئة وتوليد الكهرباء مقارنة بعملية التوليد المنفصل للكهرباء والحرارة في محطة توليد كهرباء (Power Station) وفي محطة تدفئة (Heating Station)؟

تتم المقارنة بين الأسلوبين بناءً على تساوي الطاقة المولّدة أي توليد الكهرباء بمعدل E_{el}= 80MWh وتوليد الحرارة Q_{H} = 100 MWh.

يبلغ مردود كل عملية كالتالي: المردود الصافي لمحطة الطاقة البخارية η_{SP} = 36 % ولمحطة التدفئة η_{HS} = 90 %، المردود الفعلي لاستخدام الطاقة في منشأة التدفئة وتوليد الكهرباء η_{TPS} = 88 % القيمة الحرارية الدنيا للوقود LCV = 11 kWh/kg.

الحل

1. بما أن المردود الفعلي لاستخدام الطاقة في منشأة التدفئة وتوليد الكهرباء يبلغ 88 % فإن استهلاك الطاقة الأولية لإنتاج 80 MWh كهرباء (Eel) و100 MWh حرارة (QH):

$$Q_{PS} = (E_{el} + Q_{H}) / \eta_{TPS}$$
$$= 80 + 100 / 0.88 = 204.5\ MW$$

2. عند التوليد المنفصل للكهرباء وللحرارة فإن استهلاك الطاقة الأولية:

$$Q_{separate} = E_{el} / \eta_{SP} + Q_{H} / \eta_{HS}$$
$$= 80 / 0.36 + 100 / 0.9 = 333.3\ MWh$$

3. استهلاك الوقود عند التوليد المنفصل للكهرباء وللحرارة:

$$m_{separate} = E_{separate} / LCV$$
$$= 333.3 \times 10^{3}\ kWh / 11\ kWh/kg = 30.3 \times 10^{3}\ kg$$

4. الوفر في الطاقة الأولية عند استخدام منشأة التدفئة وتوليد الكهرباء (دارة مركبة):

$$\Delta E = E_{sperate} - E_{TPS}$$
$$= 333.3 - 204.5 = 128.3\ MWh$$

5. الوفر في الوقود

$$\Delta m_{F} = \Delta E / LCV$$
$$= 128.8 \times 10^{3}\ kWh / 11\ kWh/kg = 11.7 \times 10^{3}\ kg$$

أو:

$$\Delta m_{F} / m_{seperate} = 38.6\ \%$$

تناسب منشأة توليد الكهرباء والتدفئة التي تستخدم محركات الاحتراق الداخلي للخدمة في مجال الاستطاعات الصغيرة والمتوسطة أي بين 80 kW وحتى 10 MW، ومن أجل الاستطاعات الحرارية الأعلى تستخدم منشآت توليد الكهرباء والتدفئة (الدارة المركبة) ذات العنفة الغازية.

وفقاً لنوع المحرك والوقود المستخدم فإن المردود الكهربائي لمنشآت توليد الكهرباء والتدفئة $\eta_{el} = P_{el} / Q_{F}$ يتراوح بين 30 و35%، ودرجة الاستفادة من الطاقة في المنشأة $\eta_{TPS} = (P_{el} + Q_{H}) / Q_{F}$ تتراوح بين 85 و 90 %، أما الرقم المميز للتيار σ فيتراوح بين 0.6 و0.8.

تُزوَّد منشأة توليد الكهرباء والتدفئة بمنظومة إدارة تُمكِّن من الحصول على تشغيل أوتوماتيكي بشكل كامل، وذلك عن طريق أجهزة التحكم.

يُعتَبر عند تصميم هذه المنشأة بأن زمن الاستفادة منها هو 20 عاماً، تستهلك الاستثمارات (يسترد رأس المال المستثمر) بعد 5 أعوام كحد أقصى.

تزداد اقتصادية هذه المنشأة عندما يستهلك التيار الكهربائي والحرارة طوال العام، وهذا يؤدي إلى ربط إنتاج كل من الكهرباء والحرارة والبرودة. مثل هذه المنشآت المشتركة تقدم الكهرباء طوال العام والحرارة للتدفئة في فصل الشتاء والبرودة المفيدة لتكييف أبنية الورش والمكاتب الرسمية في فصل الصيف.

اقتصادية استخدام منشأة توليد الكهرباء والتدفئة اللامركزية

تتعلق الاقتصادية بزمن الاستخدام t_u للمنشأة.

يُعرَّف زمن الاستخدام t_u بأنه النسبة بين الإنتاج السنوي للكهرباء والاستطاعة الاسمية المركبة للمولد P_{el} أو بأنه النسبة بين الإنتاج السنوي للحرارة Q_y إلى الاستطاعة الاسمية الحرارية Q_H للمنشأة:

$$t_u = E_{el} / P_{el} \quad \text{أو} \quad t_u = Q_y / Q_H \ \text{[h/a]} \ \text{[ساعة/عام]} \tag{44.9}$$

يتحدد زمن الاستخدام من خلال الحرارة المقدمة في منشأة توليد الكهرباء والتدفئة اللامركزية كما يلي:

الاستهلاك الـــمعياري (norm) للحرارة Q_N [W] في مشروع ما والاستطاعة الحرارية للتدفئة Q_H [W] لجملة المنشآت التي تقوم بتوليد الكهرباء والتدفئة وساعات الاستخدام الكامل b_v [h/a] ودرجة حرارة الوسط الخارجي المعيارية t_{amb} [°C] (الحرارة المحيطية المعيارية).

الإنتاج السنوي للحرارة لجملة من المنشآت التي تقوم بتوليد الكهرباء والتدفئة هو جداء زمن الاستخدام t_u بالاستطاعة الحرارية للجملة Q_H:

$$Q_{HM} = t_u \, Q_M \ \text{[J/a]} \tag{45.9}$$

يُحدَّد زمن الاستخدام t_u بشكل منفصل لكل جملة على حدة.

إذا استخدمت على سبيل المثال مجموعتان متماثلتان من منشآت توليد الكهرباء والتدفئة، الاستطاعة الحرارية لكل منها 200 kW لتدفئة بناء للمكاتب في برلين والاستهلاك الوسطي المعياري للحرارة (Norm) Q_N = 1000 kW، فإن زمن الاستخدام (الاستفادة) t_u هو 2480 h/a وعموماً يقابل عدد ساعات استخدام كامل قدره b_v = 1600 h/a. عدد ساعات الاستهلاك الكامل b_v يُعرَّف بأنه النسبة بين الاستهلاك السنوي لحرارة التدفئة والاستهلاك المعياري للحرارة في المشروع (حاجة المشروع من الحرارة معيارياً).

مثال 4.9

يطلب تحديد زمن استرداد رأس المال لمنشأة توليد الكهرباء والتدفئة التي تحرق الغاز ذات الاستطاعة الكهربائية 500 kW والاستطاعة الحرارية 900 kW. المعطيات اللازمة للحل تُذكَر مع الحل.

الحل

1. تكاليف الطاقة لإنتاج الحرارة بشكل تقليدي مع التيار الكهربائي.

a) انطلاقاً من أن الاستطاعة الكهربائية للمحطة العاملة على الغاز هي 500 kW والاستطاعة الحرارية لها 900 kW، وكذلك بمعرفة زمن الاستفادة $t_u = 2480$ h/a ومردود مرجل التدفئة $\eta_{HB} = 0.85$. فالاستهلاك السنوي للوقـــود (الغاز الطبـــيعي الذي قيمته الحرارية الدنيا LCV = 9.3 kWh/m³) هو 2.63 GWh/a (يـــبلغ إنتاج الحرارة عندئذ 2.23 GWh/a) أو 282×10^3 m³/a.

إذا كان سعر الغاز 0.7 *DM/m³ (0.7 مارك ألماني لكل متر مكعب)، فإن تكاليف إنتاج الحرارة باستخدام مرجل التدفئة التقليدي حوالي 0.2 مليون مارك ألماني في العام.

b) انطلاقاً من أن إنتاج الكهرباء 3.6 GWh/a وسعر التيار الكهربائي 0.25 DM/kWh فإن كلفة إنتاج الكهرباء 0.9 مليون مارك ألماني في العام.

c) التكاليف السنوية للطاقة بما فيها إنتاج الحرارة بالطريقة التقليدية بالإضافة إلى إنتاج التيار الكهربائي: $0.2 + 0.9 = 1.1 \times 10^6$ DM/a.

2. تكاليف الطاقة لمنشأة توليد الكهرباء والحرارة.

بما أن درجة الاستخدام للمنشأة 0.85 والإنتاج السنوي للحرارة والكهرباء = 3.6 + 2.23 5.83 GWh/a وبما أن سعر الغاز هو 0.7 DM/m³ فإن قيمة إنتاج الطاقة في هذه المنشأة:

$$\frac{0.7\text{DM}/\text{m}^3 \times 5.83 \times 10^6 \text{kWh}/\text{a}}{0.87 \times 9.3 \text{kWh}/\text{m}^3} = 0.5 \times 10^6 \text{DM}/\text{a}$$

3. تكاليف الصيانة منسوبة إلى إنتاج الكهرباء (0.05 DM لكل kWh) تصبح:

0.18×10^6 DM/a = 0.05 DM/kWh × 3.6 GWh/a

---

* DM تعني مارك ألماني.

الكسب السنوي (الربح) للمنشأة هو الفرق بين تكاليف الطاقة للتوليد التقليدي للطاقة وكلفة توليدها في منشأة توليد الكهرباء والتدفئة وبمراعاة تكاليف الصيانة:

$$1.1 - 0.5 - 0.18 = 0.41\times10^6 \text{ DM/a}$$

4. زمن الاسترداد إذا كانت تكاليف الاستثمار النوعية (التكاليف التأسيسية) لمنشأة توليد الكهرباء والحرارة هي 1700 DM لكل 1 kW استطاعة كهربائية فإن الكلفة الإجمالية لاستثمار هذه المنشأة تبلغ: 0.85 DM = 1700 DM/kWh × 500 kW مليون/العام

فزمن الاسترداد المحسوب إحصائياً هو: 2.07 = 0.85/0.41 عاماً.

مثال 5.9

يُطلبَ تحديد المردود الكهربائي ودرجة الاستخدام الإجمالية للطاقة لمنشأة توليد الكهرباء والحرارة اللامركزية ذات المحرك الغازي والتي استطاعتها الحرارية للتدفئة $Q_H = 930$ kW والرقم المميز للتيار σ فيها يبلغ 0.72.

يحرق في المحرك الغازي 0.04 kg من الغاز الطبيعي ذي القيمة الحرارية الدنيا LCV = 46000 kJ/kg كل ثانية.

الحل

1. التدفق الحراري مع الوقود:

$$Q_F = m_F \text{ LCV}$$
$$= 0.04 \text{ kg/s} \times 46000 \text{ kJ/kg} = 1840 \text{ kJ/s}$$

2. الاستطاعة الكهربائية لمنشأة توليد الكهرباء والحرارة

$$P_{el} = \sigma Q_H = 0.72 \times 930 = 669.6 \text{ kW}$$

3. المردود الكهربائي للمنشأة:

$$\eta_{el} = P_{el} / Q_F$$
$$= 669.6 / 1840 = 0364$$

4. درجة الاستخدام للمنشأة:

$$\eta_{total} = (P_{el} + Q_H) / Q_F$$
$$=(669.6 + 930) / 1840 = 0.869$$

10 المنشآت الشمسية الحراريةوالكهرضوئية (الفوتوفولطية)

1.10 الإشعاع الشمسي، المجمّعات الشمسية، المعدات الشمسية الحرارية

الإشعاع الشمسي من خارج الأرض (extraterrestrial) والثابت الشمسي

تُشع الشمس في كل ثانية تياراً حرارياً إجمالياً قيمته حوالي 4×10^{33} kW، يصل منه جزء صغير إلى الأرض قيمته 2.16×10^{-5} بزاوية فراغية قيمتها $32'$ أو $0.54°$ حسب الحال. يتضمن الطيف الشمسي الموجات التي يتراوح طولها λ بين 0.25 حتى ما يزيد على 0.5 μm، أي الإشعاعات فوق البنفسجية، والضوء المرئي (0.78 μm – 0.38μm) والأشعة تحت الحمراء. يعادل الإشعاع القادم من خارج الأرض والساقط على الحدود الخارجية للغلاف الجوي للأرض (0.6×10^{24} J في العام) إشعاع جسم أسود درجة حرارته 5777 K. تدعى شدة الإشعاع القادم من خارج الأرض والذي يسقط بشكل عمودي على مساحة من الأرض بعدها الوسطي عن الشمس 149.5 مليون كيلومتراً، تدعى بالثابت الشمسي $I_{SC} = 1367$ W/m².

الإشعاع العام (global) ــ الإشعاع المنتشر

يتألف الإشعاع العام E الساقط على السطح الخارجي للأرض من الإشعاع المنتشر E_d والإشعاع المباشر E_D. تتعلق شدة الإشعاع العام I بالموقع الجغرافي (خط العرض) وبالوقت (من اليوم أو من السنة) وحالة الجو، وتكون قيم الإشعاعات أعظمية في الحزام الصحراوي للأرض على جانبي خط الاستواء (في شمال أفريقيا، الشرق الأوسط، وسط آسيا، شمال وجنوب أمريكا، استراليا). يتراوح الإشعاع العام الوسطي على سطح الأرض في السنة بين 800 و2400 kWh لكل m². وتكون

قيمتـــه في وسط أوروبا 900 حتى 1100 kWh/m^2 في العام (فـــي الجبال تصـــل القيمة إلـــى 1400 kWh/m^2 في العام).

من القيم المميزة للإشعاع الشمسي في موقع معين هناك فترة سطوع الشمس اليومية أو السنوية، وتبلغ قيمتها في شمال أفريقيا 3200 حتى 3465 h/a (ساعة في اليوم)، وفي جنوب أوروبا 2300 إلى 2810 h/a وفي وسط أوروبا 1400 إلى 1900 h/a.

يتضمن المرجع [11] معطيات الإشعاع والمناخ للعالم وأوربا وألمانيا.

الإشعاع الإجمالي الساعي أو اليومي على مجمِّع (لاقط) شمسي

توضع المجمِّعات إما بشكل مائل أو توجَّه نحو الشمس. يتألف الإشعاع الساقط على مجمع مستوٍ (مسطح) مائل من إشعاع مباشر وإشعاع منتشر وإشعاع منعكس على الأرض.

لحساب الإشعاع المباشر الساعي على سطح مائل موجه نحو الجنوب تطبق العلاقة التالية:

$$I_{Dk} = I_D \cos \theta_k / \cos \theta$$

$$= I_D [\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta] \quad (1.10)$$

$$/[\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \delta] \quad [MJ] \text{ أو } [kWh/m^2.h]$$

حيث: I_D الإشعاع المباشر الساعي على سطح أفقي

θ أو θ_k زاوية سقوط الإشعاع المباشر على سطح مجمع أفقي، أو على سطح مجمع مائل مُوجَّه نحو الجنوب.

β زاوية ميل المجمع الشمسي

φ العرض الجغرافي

δ ميل (انحراف) الشمس

ω الزاوية الساعية.

ولحساب الإشعاع اليومي المباشر الساقط على مجمع مائل موجه نحو الجنوب تطبق العلاقة التالية:

$$E_{Dk} = E_D [\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega_{sk} + (\pi \omega_{sk} / 180)$$

$$\sin(\varphi - \beta) \sin \delta] / [\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi \omega_s / 180) \quad (2.10)$$

$$\sin \varphi \sin \delta] \quad [MJ] \text{ أو } [kWh/m^2 \, day]$$

حيث: ω_{sk} الزاوية الساعية لغروب الشمس من أجل سطح مائل لليوم المعتبر، ω_s الزاوية الساعية لغروب الشمس من أجل سطح أفقي لليوم المعتبر.

ولحساب ω_{sk} و ω_s نكتب:

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (3.10)$$

$$\omega_{sk} = \arccos[-\tan(\varphi - \beta)\tan\delta] \quad (a3.10)$$

يبلغ الإشعاع الإجمالي في ساعة I_k مقدار بالـ $[MJ/m^2 h]$ أو $[kWh/m^2 h]$ الذي يسقط خلال ساعة واحدة على سطح مجمع مائل مساحته 1 m^2:

$$I_k = I_D R_D + I_d (1 + \cos\beta)/2 + I\rho(1 - \cos\beta)/2 \quad (4.10)$$

حيث: I، I_D، I_d الإشعاع الساعي الإجمالي والمباشر والمنتثر حسب التسلسل، وذلك على سطح أفقي.

ρ درجة الانعكاس للأرض (Albedo: قياس قدرة سطح على عكس النور).

ولحساب الإشعاع الإجمالي في الساعة يستخدم عامل التحويل التالي:

$$R = I_k / I$$

$$= I_{Dk}/I_D + I_d/I(1 + \text{cas}\,\beta)\,2 + \rho(1 - \cos\beta)/2 \quad (5.10)$$

أما الإشعاع الإجمالي اليومي $[MJ/m^2\text{-day}]$ أو $[kWh/m^2\text{-day}]$ الذي يسقط على 1 m^3 من سطح المجمع المائل فيبلغ:

$$E_k = E \cdot R = E_{Dk} + E_d(1 + \cos\beta)/2 + E\rho(1 - \cos\beta)/2 \quad (6.10)$$

أما عامل التحويل للإشعاع الإجمالي اليومي فهو:

$$R = E_{dk}/E_D + E_d/E(1 + \cos\beta)/2 + \rho(1 - \cos\beta)/2 \quad (7.10)$$

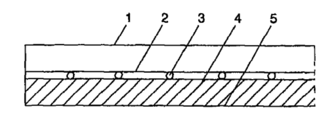
يمكن الحصول على المعلومات التفصيلية عن الإشعاع الشمسي من المرجع [11].

المجمّعات الشمسية

يمتص المجمع الشمسي الإشعاع الشمسي ثم يقوم بتحويله إلى حرارة. وهناك أنواع مختلفة من المجمعات مثل المجمعات المُركَّزة والمجمعات غير المُركَّزة والمجمعات ذات درجات الحرارة المنخفضة والمتوسطة والعالية [المرجع 11].

تستخدم في المجالات ذات درجات الحرارة المنخفضة (دون الـ °C100) المجمعات المسطحة أو المفرغة التي تستفيد من الإشعاع المباشر والإشعاع المنتشر وتُركّب في موقع ثابت وبشكل مائل. يوضح الشكل (1.10) بشكل تخطيطي تركيب مجمع مسح، وهو يتألف من صفيحة امتصاص وصفٍّ من الأنابيب أو المجاري يمر فيها ناقل حراري سائل وغطاء شفاف وعلبة (غلاف) مع عازل حراري. تستطيع المجمعات المسطحة المستخدمة لتأمين الماء الساخن للعمليات الصناعية أو للتدفئة توفير طاقة قدرها 250 إلى kWh/m² year 400 وذلك في المناخ السائد في وسط أوروبا (400 كيلو واط ساعة لكل 1 m² في السنة). أما المجمعات ذات الأنابيب المفرغة فهي تستخدم حتى درجات الحرارة 250 °C، ومجال استعمالها هو تأمين الماء الساخن والتدفئة والتبريد وعملية إنتاج الحرارة.

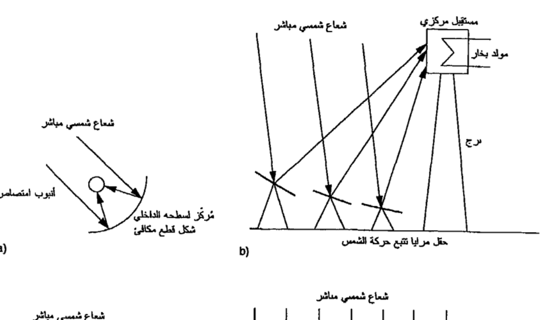
يصل الكسب السنوي للمجمعات ذات الأنابيب المفرغة إلى 300 وحتى 600 kWh/m² .

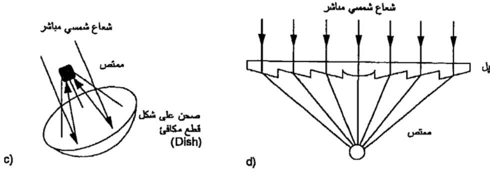


الشكل 1.10 : تركيب مجمع مسطح.

ولمجالات درجات الحرارة المتوسطة والعالية تستخدم المجمعات المركزة. يتألف المجمع المُركّز (الشكل 2.10) من مركّز (مرايا أو عدسات فرينل) ولا قط للإشعاع. وبواسطة المركّز تُرفَع شدة الإشعاع الساقط على لا قط الإشعاع بنسبة التركيز $C = A_a / A$ حيث A_a مساحة سطح الفتحة أو الفجوة (Aperture) وA مساحة السطح الممتص.

تجمع المجمّعات المركزة الإشعاع المباشر فقط، ولذلك يجب أن تتبع الشمس، وهي ذات نسبة تركيز مرتفعة، حيث يمكن الوصول إلى درجات حرارة عمل تفوق الـ 1000 °C. تستخدم المجمعات المركزة بالدرجة الأولى في المنشآت الشمسية الحرارية لتوليد التيار الكهربائي ولتأمين الحرارة لبعض العمليات الصناعية [11].





الشكل 2.10 : المجمّعات المركّزة (a) المركز على شكل قطع مكافئ، (b) حقل مرايا تتبع حركة الشمس مع مستقبل مركزي (مستقبل الإشعاع)، (c) صحن على شكل قطع مكافئ، (d) عدسة فْرينِل.

الاستطاعة الحرارية المفيدة ومردود المجمع الشمسي (كفاءة المجمع الشمسي)

تحسب الاستطاعة الحرارية المفيدة لمجمع مسطح كما يلي [11].

(8.10)	$Q_k = A\,[I_k\,F_R(\tau\,\alpha) - F_R + K_k\,(T_{ent} - T_{amb})$ [W]

حيث: A مساحة سطح المجمع $[m^2]$

I_{sk} شدة الإشعاع الشمسي في مستوى المجمع $[W/m^2]$

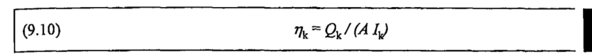
F_R عامل طرح الحرارة أو انتقالها من المجمع

$(\tau\,\alpha)$ الجداء الفعال لدرجة إرسال (نقل) الغطاء الشفاف τ ودرجة الامتصاص لهذا الغطاء

K_k عامل ضياع الحرارة الإجمالي للمجمع [W/m²K]

T_{ent} وT_{amb} درجة الحرارة عند الدخول إلى المجمع ودرجة حرارة الوسط الخارجي (درجة الحرارة المحيطية) [°C].

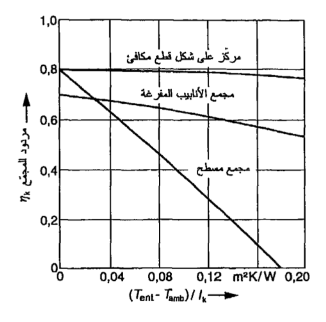
يُعرَّف مردود (كفاءة) مجمع بأنه الاستطاعة الحرارية المفيدة مقسومة على تيار الحرارة الذي يسقط على سطح المجمع، أي:



$$\eta_k = Q_k / (A\, I_k) \qquad (9.10)$$

ويحسب مردود مجمع مسطح بالعلاقة:

$$\eta_k = F_R\,[(\tau\,\alpha) - K_k\,(T_{ent} - T_{amb}) / I_k \qquad (10.10)$$



الشكل 3.10 : المنحنيات المميزة لمختلف أنواع المجمعات.

يعطي المنحني المميز لمجمع شمسي العلاقة بين مردود (كفاءة) المجمع η_k والعامل $x = T_{ent} - T_{amb}/I_k$ بشكل تخطيطي، وبمساعدة المنحني المميز للمجمع يمكن تحديد القيم المميزة له أي: المردود البصري الفعّال $F_R\,(\tau\,\alpha)_n$ عند السقوط الشاقولي للإشعاع كمحور صفري للمنحني المميز وعامل ضياع الحرارة الإجمالي $F_R\,K_k$ كمماس لزاوية الميل. يبين الشكل (3.10) المنحنيات المميزة لأنواع مختلفة من المجمعات (مجمع مسطح، مجمع الأنابيب المفرغة، المركّز مقعّر، أي بسطح

داخلي على شكل قطع مكافئ) في مجال القيم الصغيرة لـ x (أقل من $0.2\ m^2K/W$). عند درجات الحرارة العالية تختلف المنحنيات المميزة عن الخط المستقيم (وخاصة للمجمعات المفرغة والمجمعات المركّزة).

تُحسَب الاستطاعة الحرارية المفيدة Q_k لمجمع مركّز كما يلي [11]:

$$Q_k = F_R\, A_a\, [I_{Dk}\, \eta_{opt} - (K_k / C)\, (T_{ent} - T_{amb}) \qquad (11.10)$$

حيث: F_R عامل طرح الحرارة من المجمع

A_a مساحة سطح الفتحة غير المعرضة للظل

I_{Dk} شدة الإشعاع المباشر على فتحة المجمع $[W/m^2]$

η_{opt} المردود البصري للمجمع $[W/m^2K]$

C نسبة تركيز المجمِّع

T_{ent}، T_{amb} درجة حرارة الدخول، ودرجة الحرارة المحيطية [°C].

يُعرَّف المردود البصري لمجمعٍ مركّز بأنه نسبة شدة الإشعاع الشمسي المُمتَص إلى شدة الإشعاع الشمسي المباشر الساقط:

$$\eta_{opt} = \eta_{opt,o}\, K_{opt} = \rho\, \gamma\, \tau\, \alpha_a\, K_{opt} \qquad (12.10)$$

حيث: $\eta_{opt,o}$ المردود البصري للمجمع عند زاوية السقوط 0° للإشعاع المباشر

K_{opt} عامل تصحيح عند اختلاف زاوية السقوط عن الصفر (0°)

ρ درجة العاكسية للمرآة

γ عامل الالتقاط (التلقي)

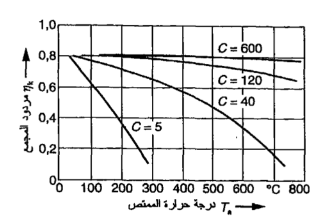
τ درجة إرسال (نقل) الغطاء الشفاف للمُمتَص.

α_a درجة امتصاص المُمتَص.

أما مردود المجمِّع المركّز فيحسب كما يلي [11]:

$$\eta_k = Q_k / A_a I_{Dk}$$
$$= F_R\, \eta_{opt} - (F_R\, K_k / C\, I_D)(T_{ent} - T_{amb}) \qquad (13.10)$$

يبين الشكل (4.10) مردود مجمع مركّز وعلاقته بدرجة حرارة المُمتَص T_a وبنسبة التركيز C (من 5 حتى 600).



الشكل 4.10 : علاقة مردود المجمع المركز بدرجة حرارة الممتص T_a وبنسبة التركيز (Concentration ratio)

درجة حرارة خروج الحامل الحراري في المجمع مهما كان نوعه تحسب كما يلي:

$$T_{exit} = T_{ent} + Q_k / (m\ C_P) \quad (14.10)$$

حيث: Q_K الاستطاعة الحرارية المفيدة للمجمع [W]

m التدفق الكتلي للحامل الحراري [kg/s]

C_p السعة الحرارية النوعية للحامل الحراري [J/kgK].

يبين الجدول (1.10) قيماً نمطية للأنواع المختلفة من المجمعات الشمسية.

الجدول 1.10: قيم نمطية (مرجعية) لأنواع مختلفة من المجمعات الشمسية.

نوع المجمع	$F_R(\tau\alpha)$*	F_RK_k** W/m^2K	درجة حرارة التشغيل °C	التكاليف ****DM/m^2
مجمع مسطح				
ـــ بدون غطاء شفاف	0.9	20-15	30	250-200
ـــ مع صفيحة زجاجية	0.8	4-3.5	أقل من 100	700-500
مجمع ذو أنابيب محلاة (مفرغة)	0.7	1.8-1.5	أقل من 250	1500-1000
مركز ذو شكل قطع مكافئ	0.8	***0.7-0.2	400	حوالي 1000

* المردود البصري الفعال للمجمع.

** عامل ضياع الحرارة الفعّال للمجمع.

*** منسوباً إلى $1\ m^2$ من سطح الفتحة (عند نسبة تركيز C قيمتها بين 20 و100).

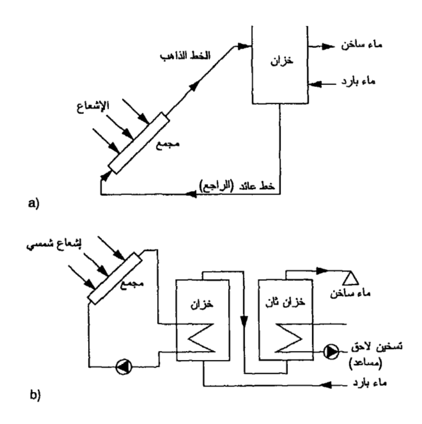
**** DM تعني مارك ألماني (المترجم).

المنشآت الشمسية الحرارية

تستخدم المنشآت الشمسية ذات درجات الحرارة المنخفضة على سبيل المثال في تدفئة مياه المسابح (درجة الحرارة بين 23 و30 °C) وفي تسخين المياه (45 حتى 60 °C) وللتدفئة (T_v بين 30 و 90 °C) ولإنتاج البرودة (للتبريد) أقل من 10 °C).

إن تسخين المياه هو الاستخدام الأكثر انتشاراً للطاقة الشمسية. يبين الشكل (5.10) نوعين من المنشآت الشمسية لتسخين المياه:

- المنشأة التي تعتمد على قوة الثقالة وذات الدورة الأحادية، من أجل التشغيل عندما تكون درجة حرارة الوسط الخارجي أعلى من 0 °C.
- المنشأة الشمسية ذات الجريان القسري الثنائية الدورات لتسخين المياه في الصيف والشتاء.



الشكل 5.10 : منشأة شمسية لتحضير الماء الساخن (a) جريانها يعتمد على قوة الثقالة وذات دورة أحادية، (b) ذات جريان قسري ودورتين.

تتألف المنشأة البسيطة التي تعتمد على قوة الثقالة من مجمع وخزان ماء ساخن وأنابيب للذهاب والإياب. إلى جانب المركبات السابقة تتضمن المنشأة ذات الجريان القسري بدورتين مضخة تحريك

ونظام تحكم بالإضافة إلى مبادل حراري، لأنه يستخدم في المجمع ناقل حراري لا يتجمد، ويستخدم الماء في الخزان. ولضمان تحضير الماء الساخن يُضاف للمنشأة جهاز للتسخين الإضافي.

هناك أنواع أخرى من المعدات الشمسية التي جرى وصفها بشكل مفصَّل في [11].

يعرض المثال (1.10) حساباً مبسطاً لسطح المجمع المستخدم لتحضير الماء الساخن في منشأة شمسية.

مثال 1.10

يُطلبَ حساب مساحة سطح المجمع في منشأة شمسية لتحضير الماء الساخن.

في موقع تركيب المنشأة يمكن قبول المواصفات التالية للمنطقة وللمنشأة التي يجري اختيارها:

- الإشعاع الشمسي اليومي في مستوي المجمع المائل المسطح هو $E = 5$ kWh/m²d.
- الاستهلاك اليومي للماء الساخن $m_{ww} = 1000$ kg/s.
- درجة حرارة الماء الساخن $t_{ww} = 45$ °C والماء البارد $t_{cw} = 14$ °C.
- السعة الحرارية النوعية للماء $c_{Pw} = 1.163$ Wh/kgk.
- المردود الوسطي للمجمع (بحسب الخبرة) $\eta_k = 48$ %.

الحل:

1. الاستهلاك اليومي للحرارة

$$Q_{ww} = m_{ww}\, c_{pw}(t_{ww} - t_{cw})$$
$$= 1000 \text{ kg/d} \times 1.163 \text{ Wh/kgK } (45 - 14) \text{ K} = 36053 \text{ Wh/d}$$

2. لحساب الكسب الحراري اليومي للمنشأة الشمسية لكل m^2 من سطح المجمع:

$$Q_{sol} = E\, \eta_k = 5 \text{ kWh/m}^2\text{d} \times 0.48 = 2.4 \text{ kWh/m}^2\text{d}$$

3. المساحة اللازمة لسطح المجمع:

$$A = Q_{ww} / Q_{sol} = 36053 \text{ Wh/d} / 2400 \text{ Wh/dm}^2 = 15 \text{ m}^2$$

2.10 المنشآت الحرارية الشمسية لتوليد الكهرباء

Solar Thermal Power Generation

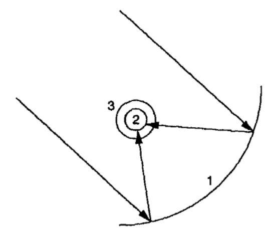
تقوم هذه المنشآت أولاً بتحويل الطاقة الشمسية إلى حرارة ثم إلى عمل ميكانيكي. وللحصول على مردود عالٍ تستخدم مجمعات شمسية مركزة. للحصول على القوة الميكانيكية ثم توليد

الكهرباء تستخدم بشكل رئيسي مزارع شمسية أو أبراج شمسية. ويتم تحويل الطاقة الشمسية إلى كهربائية في خلايا شمسية.

إن المواقع الأنسب لهذه المنشآت هي المناطق المشمسة التي يفوق الإشعاع الشمسي فيها 1600 kWh/m^2 وعلى مدى 2400 حتى 3400 ساعة في العام، ومنشآت توليد الكهرباء بالطاقة الشمسية ملائمة للبلدان المجاورة للحزام الصحراوي في أفريقيا، أستراليا، الشرق الأوسط، وسط أسيا، كاليفورنيا (USA)، بلدان البحر الأبيض المتوسط (جنوب أوروبا، شمال أفريقيا)، أمريكا اللاتينية، الصين والهند.

محطات توليد الكهرباء باستخدام المزارع الشمسية

تتألف المحطة من مجموعة من المرايا الشمسية الموصولة على التوازي المربوطة بمحطة توليد طاقة تقليدية. تتألف المجموعة الواحدة من مركِّز مقعَّر على شكل قطع مكافئ مُوجَّه ومن أنبوب امتصاص يجري فيه وسيط العمل المتوضِّع في غلاف زجاجي مفرغ من الهواء (الشكل 6.10). تعرف نسبة التركيـــز C لمجمع بأنها النسبة بين مساحة الفتحة (الفجوة) A_a ومساحة الامتصاص A_{abs}. وتصل هذه النسبة في المجمع المقعّر الذي يأخذ شكل قطع مكافئ 20 حتى 100، وبذلك يمكن تسخين وسيط العمل (زيت حراري أو بخار ماء) حتى 350 إلى 400 °C.



الشكل 6.10 : المركِّز المقعّر بشكل قطع مكافئ (1) وأنبوب الامتصاص (2) مع الغلاف الزجاجي المفرغ من الهواء (3).

مثال 2.10

يُطلَب حساب الاستطاعة الحرارية المفيدة Q_k وكذلك درجة حرارة الخروج لوسيط العمل T_{exit} في مركز بشكل قطع مكافئ. شدة الإشعاع المباشر في مستوى المجمع تبلغ $I_{Dk} = 750\ W/m^2$ والمردود البصري $\eta_{opt} = 0.74$. مساحة الفجوة التي تتعرض للظل $A_a = 240\ m^2$، نسبة التركيز $C =$ 40. درجة حرارة دخول الناقل الحراري $T_{ent} = 280°C$ وتدفقه الكتلي $m = 0.6kg/s$ وسعته الحرارية النوعية $C_p = 3200\ kJ/kgK$. درجة حرارة الوسط المحيط $T_{amb} = 30\ °C$. عامل نفوذ الحرارة الإجمالي $K_k = 7\ W/m^2K$ وعامل تصريف الحرارة للمجمع $F_R = 0.96$.

الحل

الاستطاعة الحرارية المفيدة للمجمّع

$$Q_k = F_R\, A_a\, [I_{Dk}\, \eta_{opt} - (K_k / C)\, (T_{ent} - T_{amb})]$$
$$= 0.96 \times 240\ [750 \times 0.74 - (7 / 40)\ (280 - 30)] = 117792\ W$$

درجة حرارة خروج الناقل الحراري من المجمع:

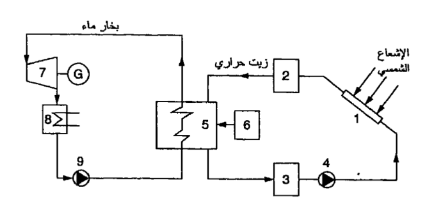
$$T_{exit} = T_{ent} + Q_k / (m\, c_P)$$
$$= 280 + 117792 / 0.6 \times 3200 = 341.35\ °C$$

أصبحت المنشآت التي تستخدم المزارع الشمسية ناضجة من الناحية الهندسية ومناسبة اقتصادياً، وهي في الوقت الحاضر النوع الوحيد من المنشآت الحرارية الشمسية الرائجة تجارياً.

تمّ في صحراء Mojave في كاليفورنيا، التي يصل فيها الإشعاع الوسطي السنوي إلى 2400 kWh/m²، منذ عام 1984 تركيب 9 محطات شمسية تجارية لتوليد الكهرباء ذات مجمعات مقعّرة على شكل قطع مكافئ واستطاعتها الإجمالية 354MW، وسميت المنشآت بـــ SEGS (Solar Electric Generating Systems) أي المجموعة الشمسية لتوليد الكهرباء، وتبلغ كلفة الكهرباء التي تولدها هذه المجموعة الشمسية 0.19 إلى 0.14 DM/kWh [5].

يبين الشكل (7.10) محطة توليد للكهرباء عن طريق مزرعة شمسية. يتألف الجزء الشمسي من حقل من المجمعات التي تأخذ شكل قطع مكافئ بالإضافة إلى خزاني حرارة. يسخَّن وسيط العمل في المجمعات (الوسيط هو زيت حراري) ثم يرسل إلى مولد بخار. ثم يحصل تحول آخر للطاقة في

العنفة البخارية مع المولد. تركب معدات حرق إضافي، يتم فيها حرق الغاز الطبيعي، بحيث يكتمل بذلك عمل المنشأة.



1 حقل مجمعات على شكل قطع مكافئ
2 صهريج تخزين (حار)
3 صهريج تخزين (بارد)
4 مضخة الزيت الحراري
5 مولد بخار مع محمص
6 تسخين إضافي (إحراق غاز طبيعي)
7 عنفة بخارية مع مولد
8 مكثف
9 مضخة تغذية

الشكل 7.10 : مخطط وصل محطة توليد الكهرباء باستخدام مزرعة شمسية.

ويبين الجدول (2.10) المواصفات الفنية للمنشأة SEGS VII وVIII التي استطاعتها الكهربائية 30 و80 MW [5].

الجدول 2.10: المواصفات الفنية لمحطة توليد الطاقة باستخدام المزرعة الشمسية SEGS VII و VIII في كاليفورنيا.

SEGS	VII	VIII
الاستطاعة الكهربائية MW	30	80
المردود الحراري %	37.5	37.6
مساحة فتحة المجمع [10^3 m^2]	194	464
مردود الحقل [%]	43	53
الإنتاج السنوي الصافي [GWh/a]	93	253
تكلفة إنتاج الكهرباء [DM/kWh]	0.19	0.14

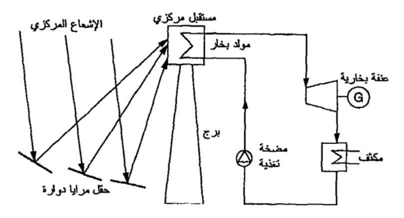
يمكن أن يصل المردود السنوي الإجمالي إلى 15 %. تعمل هذه المنشآت بشكل هجين (مشترك) (Hybrid)، حيث تساهم الكمية الإضافية من الوقود (الغاز) التي تحرق في هذه المنشأة فقط بنسبة 25 %.

يصل التشغيل الشمسي الصافي إلى 1800 ساعة في العام، ويتراوح عدد الساعات الإجمالي لعمل المنشأة في العام بين 3147 و3169 h/a [5].

محطات توليد الكهرباء باستخدام الأبراج الشمسية

يبين الشكل (8.10) مخطط وصل محطة توليد باستخدام الأبراج الشمسية، وتتألف المنشأة من جزء شمسي وجزء يحوي محطة توليد كهرباء تقليدية. يتضمن الجزء الشمسي حقل مرايا دوارة (Heliostats) ومستقبل إشعاع (مستقبل مركزي) (receiver) يركب على ذروة البرج، وربما خزان حرارة. تتألف المرآة الدوارة (Heliostat) التي تعكس الشمس في اتجاه واحد من مرآة مسطحة سطحها 25 إلى 150 m^2.

يتم تركيز الإشعاع الشمسي المباشر الساقط بواسطة حقل المرايا الدوارة على المستقبل المركزي. تتطلب المرايا الدوارة العاكسة توجيهاً مستمراً بواسطة محور مزدوج. يتم توجيه كل مرآة عاكسة بواسطة حاسوب (كومبيوتر)، بحيث تتناسب زاوية ميلها وتوجيهها مع ارتفاع الشمس في الأوقات المختلفة.



الشكل 8.10 : مخطط وصل محطة توليد الكهرباء ذات البرج الشمسي.

تتحدد الاستطاعة الحرارية لمنشأة ذات برج شمسي بالإشعاع ومساحة سطح المرايا الدوارة والضياعات الحرارية. وتتراوح درجة حرارة الممتص الأعظمية بين 400 و1000 °C، أما درجة التركيز C أي النسبة بين المساحة الإجمالية لسطوح المرايا ومساحة سطوح اللواقط فهي تتراوح بين بضع مئات و1500.

يستخدم بخار الماء والهواء والمعادن السائلة (الصوديوم) والأملاح العضوية المذابة كحوامل حرارية. تُشغَّل عنفة بخارية بواسطة الوسيط العامل المُسَخَّن في الممتص (بخار الماء).

وقد تم حتى الآن تركيب 7 منشآت تجريبية بأبراج شمسية ذات استطاعة كهربائية 18 MW[11] منها منشأة واحدة باستطاعة 10 MW في كاليفورنيا (Solar One) تم إيقافها عن العمل قبل عدة سنوات.

يبين الجدول (3.10) المواصفات الفنية للمنشأة ذات البرج الشمسي CESA-1 باستطاعة كهربائية 1.2 MW في Almerica (إسبانيا).

يستخدم كحامل حراري في المجّمع بخار الماء، ويستخدم الملح كوسيط تخزين في خزانات الحرارة التي سعتها التخزينية 2.7 MWh (مُحوَّلةً إلى ما يكافئها من إنتاج الطاقة الكهربائية). يتم في المستقبل المركزي توليد بخار ماء محمص بضغط 100 bar ودرجة حرارة 520 °C. يبلغ المردود الإجمالي للمنشأة ذات البرج الشمسي SSPS/CRS في Almeria حوالي 7 %.

الجدول 3.10: المواصفات الفنية للمنشأة ذات البرج الشمسي CESA-1

المميزات	القيمة
الاستطاعة الشمسية، MW	5.5
الاستطاعة الحرارية، MW	4.95
الاستطاعة الكهربائية، MW	1.2
مساحة سطوح المرايا الدوارة، 10^3m^2	حوالي 12
ارتفاع البرج، m	80

في المشروع الأوروبي Phoabus (الاستطاعة الكهربائية تبلغ 30 MW) وفي المشروع الشمسي 100 (استطاعته 100 MW) في جنوب أوروبا يُنتَظر الوصول إلى مردود إجمالي قدره 15 % وبحيث تكون تكاليف إنتاج الطاقة الكهربائية أقل من 0.2 DM/kWh.

تستخدم كمستقبلات مركزية في أكثر الأحيان مستقبلات مفتوحة أو مستقبلات ذات حجرة فارغة. يُسَخِّن الإشعاع الشمسي الممتص الحاملَ الحراري في حزمة أنابيب، تستخدم من أجل درجات الحرارة التي تصل إلى 550 °C المناسبة لعملية البخار مستقبلات أسطوانية. أما من أجل محطات توليد الطاقة الكهربائية باستخدام العنفات الغازية فتلزم درجات حرارة تصل إلى 1000°C، وهنا يناسب المستقبل ذو الحجرة الفارغة الذي يتمتع بنسبة عالية بين ارتفاع البرج ومساحة حقل المرايا الدوارة، ويصنع البرج إما من الفولاذ أو من الإسمنت المسلح بالفولاذ. تناسب في المواقع القريبة من خط الاستواء المستقبلات المفتوحة مع المرايا الدوّارة حول البرج، وعند درجات العرض الأعلى تُرَكّب المستقبلات ذات الحجرة الفارغة مع حقل شمالي أو جنوبي في النصف الشمالي أو

الجنوبي للكرة الأرضية. تتعلق مساحة حقل المرايا العاكسة بالاستطاعة الكهربائية P_{el}، فعندما تكون الاستطاعة 20 أو 100 MW فإن المساحة اللازمة تكون 0.5 أو 3.3 km^2 [15].

إن سبب الضياعات الحرارية هو الانعكاس الناقص وأخطاء الإنتاج والتركيب وتعرض المرايا الدوارة العاكسة للظل. يتراوح مردود حقل المرايا العاكسة η_{hf}، والذي يُعرَّف بأنه النسبة بين الشعاع الساقط على سطح الممتص والإشعاع المباشر على المرايا الدوارة، بين 55 و 80%.

تحسب الاستطاعة المفيدة اللحظية للإشعاع من أجل حقل مرايا دوارة مساحته الإجمالية A_{hf} كما يلي:

$$E_{f,u} = A_{hf}\ I_{Dn}\ \eta_{hf} \quad [W] \qquad (15.10)$$

حيث: I_{Dn} كثافة الإشعاع المباشر على السطح العمودي على الإشعاع [W/m^2].

η_{hf} مردود (كفاءة) حقل المرايا العاكسة الدوارة.

كفاءة (فعالية) المنشآت الحرارية الشمسية في توليد الكهرباء

تحسب الاستطاعة المفيدة للإشعاع Q_u من أجل حقل مجمعات في منشأة ذات مزرعة شمسية تحوي n مجمعاً على شكل قطع مكافئ كما يلي:

$$Q_u = n\ I_D\ A_a\ \eta_{kf} \qquad (16.10)$$

حيث: A_a سطح الفتحات لمجموعة المجمعات [m^2]

I_D شدة الإشعاع المباشر في المستوى المائل للفتحة [W/m^2]

η_{kf} مردود حقل المجمعات.

يُحسَب مردود مجموعة المجمعات التي تأخذ قطع مكافئ كما يلي:

$$\eta_k = \rho\ \sigma_{abs} - (K_k/C\ I_D)\ (T_{abs} - T_{amb}) - (\varepsilon_{abs}\ \sigma/C\ I_D)\ (T^4_{abs} - T_{amb}) \qquad (17.10)$$

حيث: ρ درجة الانعكاس في العاكس أو الممتص

σ_{abs} أو ε_{abs} درجة امتصاص الممتص أو درجة إصداره

K_k عامل نفوذ الحرارة [W/m^2K]

C نسبة التركيز

T_{abs} أو T_{amb} درجة حرارة الممتص أو الوسط الخارجي [K].

تعتمد الاستطاعة المفيدة $E_{f,u}$ لحقل مرايا عاكسة دوارة في مستقبل مركزي لمحطة توليد كهرباء ذات برج شمسي، باعتبارها الاستطاعة الحرارية Q_u المفيدة لتسخين وسيط العمل. يذهب جزء من الإشعاع إلى الوسط المحيط ضياعاً. تتألف ضياعات الطاقة من المستقبل إلى الوسيط المحيط من ضياعات الانعكاس $E_{los,r}$ والضياعات الحرارية بفعل الحمل ($Q_{los,c}$) والإشعاع ($Q_{los,R}$). والتوصيل عند عملية التحويل في المستقبل ($Q_{los,cond}$).

وتصبح الاستطاعة الحرارية المفيدة Q_u للممتص:

$$Q_u = E_{f,u} - E_{los,r} - (Q_{los,c} + Q_{los,R} + Q_{los,cond}) \quad [W] \tag{18.10}$$

وكذلك:

$$Q_u = F_R\, A_a\, [I_a - K_k\, (T_{ent} - T_{amb})\, A_f / A_a]$$
$$= m\, (h_{exit} - h_{ent}) \quad [W] \tag{19.10}$$

حيث: F_R عامل تصريف الحرارة

A_a مساحة فتحة المستقبل [m^2]

I_a استطاعة الإشعاع الشمسي الممتصة في كل 1 m^2 من مساحة الفتحة [W/m^2]

K_k عامل نفوذ الحرارة الإجمالي للمستقبل [W/m^2K]

T_{ent} وT_{amb} درجة حرارة الدخول إلى المجمع ودرجة حرارة الوسط الخارجي [K]

A_f مساحة حقل المرايا العاكسة الدوارة [m^2]

m التدفق الكتلي للحامل الحراري في الممتص [kg/s]

h_{ent}، h_{exit} الإنتالبي عند الدخول أو الخروج للحامل الحراري [J/kg]

تحسب استطاعة الإشعاع الشمسي الممتص كما يلي:

$$I_a = (E_{f,u} - E_{los,r}) / A_a = I_{Dn}\, \rho\, (\gamma\, \tau\, \alpha)\, K_{opt} \quad [W/m^2] \tag{20.10}$$

حيث: I_{Dn} كثافة الإشعاع المباشر الساقط بشكل عمودي

ρ درجة الانعكاس للمتص

γ درجة الالتقاط للمتص

τ درجة إرسال (نقل) الغطاء الشفاف للمستقبل ($\tau = 1$ عندما لا يُستخدم غطاء)

α درجة امتصاص الممتص

K_{opt} عامل تصحيح تغير المردود للمجمع مع الزمن.

عامل الالتقاط γ للممتص هو نسبة الإشعاع المنعكس من المرايا الدوارة العاكسة إلى الإشعاع الذي يسقط على الممتص.

مردود المستقبل هو:

$$\eta_R = Q_u / E_{f,u} \tag{21.10}$$

حيث: $E_{f,u}$ استطاعة الإشعاع المفيدة لحقل المرايا العاكسة الدوارة [W].

ويحسب تيار الضياع الحراري $Q_{los,c}$ بالحمل في المستقبل كما يلي:

$$Q_{los,c} = \alpha_c \, A_{abs} \, (T_{abs} - T_{omb}) \quad [W] \tag{22.10}$$

حيث: α_c عامل انتقال الحرارة بين فتحة الامتصاص والوسط المحيط (6 حتى 18 W/m²K)

A_{abs} مساحة سطح الممتص [m²]

T_{abs} وT_{omb} درجة حرارة الممتص والوسط المحيط [K].

أما تيار الضياع الحراري $Q_{los,cond}$ بفعل التوصيل الحراري فهو صغير عندما يكون هناك عزل جيد للمستقبل وهو يحسب كما يلي:

$$Q_{los,cond} = A_{abs} \, (T_{abs} - T_{amb}) / [(\delta / \lambda)_w + (\delta / \lambda)_i \, 1 / \alpha_a] \quad [W] \tag{23.10}$$

حيث: δ_w و δ_i سماكة الجدار والعازل [m]

γ_w وλ_i عامل التوصيل الحراري لمادة الجدار والعازل [W/mK]

α_a عامل انتقال الحرارة للسطح الخارجي للممتص [W/m²K].

لحساب تيار الضياع الحراري $Q_{Los,R}$ بفعل الإشعاع والانعكاس:

$$Q_{los,R} = \rho \, E_{f,u} / [1 - \rho \, (1 - r_r)] + A_{abs} \, \varepsilon \, \sigma \, (T^4_{abs} - T^4_u)$$

$$/[(1 - \rho) \, (1 - \varepsilon) \, (1 - r_r)] \quad [W] \tag{24.10}$$

حيث: $E_{f,u}$ استطاعة الإشعاع المفيدة لحقل المرايا العاكسة الدوارة [W]

ρ درجة الانعكاس الفعالة والممتص

r_r نسبة سطحي الفتحة والممتص للمستقبل المركزي

ε درجة الإصدار للممتص في مجال الموجات الطويلة $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ W/m² K⁴

يكون المستقبل المفتوح في تبادل مباشر بالإشعاع مع الوسط المحيط ويكون فيه $r_r = 1$، أما الضياعات الحرارية بالإشعاع والانعكاس فهي:

$$Q_{R,r} = \rho \, E_{f,u} + A_{abs} \, \varepsilon \, \sigma \, (T^4_{abs} - T^4_{amb}) \quad [W] \tag{25.10}$$

مجموعة صحن ستيرلينغ Dish-Stirling

تتألف الجملة الشمسية ذات الصحن الذي يأخذ شكل جسم مكافئ دوراني (Paraboloid) بالإضافة إلى محرك ستيرلينغ من مرآة مقعرة تأخذ شكل جسم مقعّر دوراني (صحن) ومستقبل للإشعاع (مستقبل) ومحرك احتراق (محرك ستيرلينغ ذي غاز ساخن) يمكن وصله بمولد كهربائي. ولهذه المنشآت أعلى مردود لتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة ميكانيكية وكهربائية. تُركّب مثل هذه المنشآت باستطاعة كهربائية إجمالية قدرها MW 8. وهناك في الولايات المتحدة مُركِّزات قطرها بين 7 و12 m ونسبة التركيز فيها C تتراوح بين 240 و2500. تصل درجة حرارة الممتص T_a القيمة 300 حتى 800 °C ومردود المركِّز 63 حتى 77%.

وتمّ منذ آذار (مارس) 1992 في Almeria (إسبانيا) بشكل متواصل تشغيل ثلاث مجموعات ذات صحون ومحرك ستيرلينغ من الجيل الثالث أنتجتها شركة SBP (ألمانية في مدينة Stuttgart) (الشكل 9.10) [11]. يبين الجدول (4.10) المواصفات الفنية لهذه المنشأة.



الشكل 9.10 : مخطط جملة الصحن (الذي يأخذ شكل جسم مقعر دوراني) ومحرك ستيرلينغ.

تصل الاستطاعة التصميمية الكهربائية لجملة الصحن ومحرك ستيرلينغ إلى 9 kW عندما يكون الإشعاع 1000W/m². تُوجَّه المرآة التي شكلها جسم مقعَّر دوراني نحو الشمس عن طريق محورين، بحيث تصل نسبة التركيز إلى 4000 يعمل محرك سترلينغ من النوع V-160 من صنع شركة SOLO (في مدينة Stuttgart بألمانيا) بواسطة الهيليوم كعنصر عمل، ويصل مردوده الحراري عند 40 إلى 150 bar و250 و650 °C حتى 33 %. تم التوصل حتى الآن إلى 7.8 kW وبمردود إجمالي قدره 21%. عند نسب تركيز عالية (حتى 4000) ودرجات حرارة عالية في المجال من 700 إلى 900 °C يمكن أن يرتفع المردود الحراري حتى 40% والمردود الإجمالي ليصل 23 إلى 25 %. إذا أمكن التوصل إلى تصنيع صحن بكلفة منخفضة، وتحقق تحسين تصميمي لا مركزي في المناطق الجنوبية المعزولة والبعيدة وبشكل اقتصادي. أي أنه يجب تخفيض تكاليف الاستثمار الحالية التي تتراوح بين 12500 و37000 DM لتصبح 3000 DM لكل 1 kW.

الجـــدول 4.10: المواصـــفات الفـــنية لجملة الصحن (شكله جسم مكافئ دوراني) ومحرك ستيرلينغ

المقدار المميز	قيمته
الاستطاعة الكهربائية (عند الإشعاع $1000W/m^2K$) [kW]	9
المردود [%]	حتى 25
المرآة المقعرّة التي تأخذ شكل جسم مكافئ دوراني (الصحن)	غشاء من الفولاذ الجيد سماكته 0.2 mm مع مرآة زجاجية رقيقة
القطر [m]	7.5
البعد المحرقي [m]	5
المساحة [m^2]	44
نسبة التركيز	4000

محطة توليد الكهرباء ذات تيار الهواء المتصاعد

تتألف المنشأة من مسخن هواء شديد البساطة كبير المساحة، ومدخنة وعنفة هوائية (الشكل 10.10).

يتسخن الهواء بسبب الإشعاع الشمسي الموارد عبر القبة التي تسمح بنفوذ الضوء، فيصعد ماراً في المدخنة وعابراً العنفة الهوائية. تتحدد قوة الرفع بواسطة فرق الكثافة بين الهواء البارد والساخن بالإضافة إلى ارتفاع المدخنة. تنشأ قوة الرفع بفعل فرق الضغط الذي يؤدي إلى جريان الهواء، ويُحسب فرق الضغط بالنسبة لـــ $1\ m^2$ كما يلي:

$$\Delta p = g\,H\,(\rho_c - \rho_w) \quad [N/m^2] \tag{26.10}$$

حيث: g التسارع الأرضي [m/s^2] (قيمته 9.81)

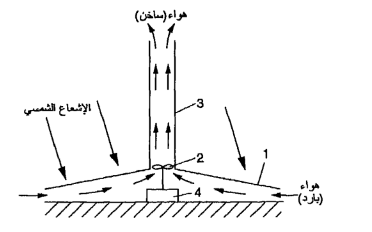
H ارتفاع المدخنة [m]

ρ_c الكتلة النوعية للهواء البارد عند درجة الحرارة المحيطية [kg/m^3]

ρ_w الكتلة النوعية للهواء الدافئ عند درجة حرارة المدخنة الوسطية [kg/m^3].

تتحول طاقة الضغط إلى طاقة حركية للهواء الجاري. يمكن حساب سرعة الهواء في المدخنة من معادلة برنولي:

$$w = \sqrt{2\Delta p\,\rho_w} \quad [m/s] \tag{27.10}$$



الشكل 10.10 : مخطط محطة توليد الكهرباء ذات تيار الهواء المتصاعد.

تحسب استطاعة العنفة الهوائية بالاستعانة بسرعة الهواء ومساحة مقطع المدخنة بطريقة مماثلة للعنفات الريحية (انظر الفقرة 2.12).

أما مردود محطة توليد الكهرباء ذات تيار الهواء المتصاعد فينتج من العلاقة:

$$\eta = P_{\mathrm{T}} / I_{\mathrm{A}} \qquad (28.10)$$

حيث: P_{T} استطاعة العنفة الهوائية [W]

I شدة الإشعاع العام [W/m²]

A مساحة سطح مجمع تسخين الهواء [m²].

أنشئت أول محطة من هذا النوع في إسبانيا وتعمل منذ عام 1981، ومواصفاتها الفنية التفصيلية مبينة في الجدول (5.10).

الجدول 5.10: المواصفات الفنية لمحطة توليد الكهرباء ذات تيار الهواء المتصاعد في إسبانيا.

المعطيات	القيمة
الاستطاعة الإسمية، kW	50
نصف قطر المجمع الشمسي، m	122
ارتفاع المدخنة وقطرها، m	200، 10
قطر العنفة، m	10
سرعة الهواء في المدخنة، m/s	7.6
إنتاج الطاقة الكهربائية، MWh/a	42
المردود الإجمالي، %	0.05

محطة توليد الكهرباء باستخدام حرارة مياه البحار

تم تجريب أول منشأة من هذا النوع باستطاعة قدرها 40 kW عام 1930 في كوبا. عن طريق امتصاص الأشعة الشمسية يصبح الماء المجاور للسطح الخارجي في المحيط دافئاً، وذلك في المناطق الاستوائية، وتصل درجة حرارته في الشتاء إلى 250 °C وفي الصيف إلى 30 °C. تمتد هذه المنطقة من خط العرض 35° شمال خط الاستواء حتى خط العرض 30 °C جنوباً. وعلى عمق 500 m تكون درجة حرارة الماء ثابتة وتبلغ 5 إلى 8 °C. يمكن تحويل الطاقة الشمسية ترموديناميكاً إلى طاقة كهربائية، وأكبر مردود حراري ينتج باستخدام دورة كارنو بين درجة حرارة الماء عند طبقة السطح الخارجي (T_o) وعند العمق (T_t) للمحيط المداري:

$$\eta_{th} = 1 - T_t / T_o \qquad (29.10)$$

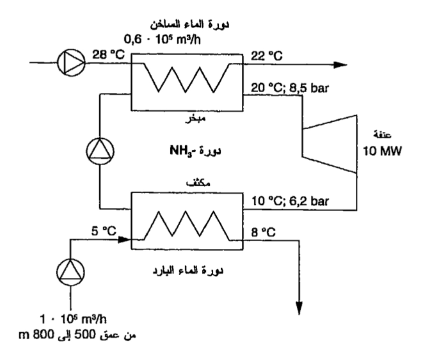
يحسب مردود محطة من هذا النوع من القيمتين $\eta_{th,c}$ ودرجة الجودة η_{Good}.

$$\eta_{PS} = \eta_{th,c}\, \eta_{Good} \qquad (30.10)$$

يمكن لقيمة η_{PS} أن تصل 3 إلى 4 %.

يسقط على بحار الكرة الأرضية 4/5 مما يسقط من الإشعاع الشمسي الإجمالي الذي يسقط على سطح الأرض، وهذا يعادل تياراً حرارياً في العام الواحد قدره 0.85×10^{18} kWh/a. يسقط يومياً على كل متر ربع في المنطقة القريبة من خط الاستواء 17 إلى 20 MJ/m²d، وتبلغ كثافة الاستطاعة 12 W لكل m² من مساحة سطح البحار. يستخدم مفهوم OTEE (Ocean Thermal energy conversion) أي (تحويل الطاقة الحرارية للمحيط) لتوليد الكهرباء من حرارة الماء (البحر)، والمخطط الذي يبين مبدأ عمل هذه المحطة مبين على الشكل (11.10). تتألف المحطة من مبخّر وعنفة بخارية ومكثف، ومضخة، ويستخدم كوسيط عمل الأمونياك. تضاف إلى المبخر حرارة السطح الخارجي للماء (درجة الحرارة تتراوح بين 27 و 30 °C) ويستخدم كوسيط تبريد الماء البارد (درجة حرارته بين 5 و8 °C) المسحوب من عمق 500 حتى 800 m. من أجل استطاعة كهربائية قدرها 20 MW يجب أن يمرر على المبخر والمكثف كميات متساوية تقريباً من الماء الساخن والبارد (حوالي 2000 m³/h). تبلغ الاستطاعة الحرارية لأول منشأة تجريبية بالقرب من هاواي (USA) 2.8 MW، أما الاستطاعة الكهربائية فتبلغ 50 kW (max). وقد بلغت الاستطاعة

الصافية 18 kW. يبلغ قطر التمديدات المصنوعة من البولي إيتلين من أجل الماء البارد 600 mm وطولها 650 m. كما يوجد في اليابان منشأة استطاعتها الكهربائية 100 kW.



الشكل11.10 : مخطط منشأة توليد الكهرباء باستخدام حرارة ماء المحيط.

يمكن استخدام التيار المُوَلَّد لإنتاج الهيدروجين عن طريق التحليل الكهربائي للماء. تكاليف الاستثمار هنا أقل من التكاليف في محطات التوليد التقليدية الحرارية والنووية، وتكاليف الكهرباء حوالي 0.04 DM/kWh عند خرج المحطة. إن أفضل شكل لنقل الطاقة إلى مواقع الاستهلاك هو نقل الهيدروجين إليها.

مثال 3.10

ما هو مردود محطة توليد الكهرباء باستخدام حرارة ماء المحيط عندما تكون درجة حرارة الماء عند الطبقة السطحية لمحيط استوائي 30°C (T_0) وفي العمق T_t = 8° C؟ درجة الجودة للمحطة $\eta_{Good} = 0.5$.

الحل

المردود الحراري لدورة كارنو بين T_0 و T_t:

$$\eta_{th,c} = 1 - T_t / T_o$$
$$= 1 - (8 + 273)\ K / (30 + 273)\ K = 7.26\ \%$$

وبالتالي فمردود محطة توليد الكهرباء باستخدام حرارة ماء المحيط:

$$\eta_{PS} = \eta_{th,c}\ \eta_{Good} = 0.072 \times 6\ 0.5 = 3.63\ \%$$

3.10 المنشآت الكهرضوئية Photovoltaics

1.3.10 الخلايا الشمسية، الجملة الشمسية والمولد الشمسي

الخلية الشمسية

اكتشف التأثير الكهرضوئي (الكهربائي ــ الضوئي) عام 1839 من قبل العالم Becquerel. يحدث تهييج كهرضوئي لالكترون عن طريق امتصاص طاقة كمّ* (Quantun) من الضوء *hν*. إن الطاقة الحركية الأعظمية للالكترون المنبعث تابع خطي لتردد الضوء ν، وكثافة تيار الكهرباء بفعل انبعاث (الالكترونات) بتأثير الضوء متناسبه مع شدة الإشعاع الذاتي للضوء، وتحت حد معين للتردد لا يحدث أي انبعاث بتأثير الضوء، وقد اكتشف Bell Telephone في عام 1954 (USA)، مبدأ الخلايا الشمسية. الخلية الشمسية هي أحد عناصر المجموعة الكهرضوئية (PV- System) التي تقوم بالتحويل المباشر لطاقة إشعاع الضوء إلى طاقة كهربائية (تيار مستمر).

> **!** *بامتصاص الضوء يتولد في أنصاف النواقل حوامل للشحنة: الكترونات ذات شحنة سالبة، ومن المواقع غير المشغولة بالإلكترونات تتولد أماكن ذات شحنة موجبة (ثقوب)، ويؤدي ذلك إلى نشوء توتر (جهد) كهربائي.*

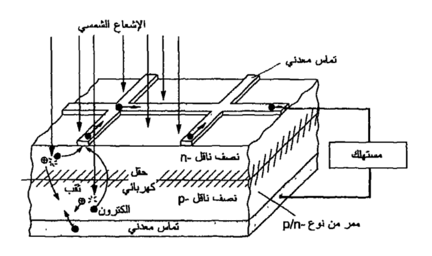
يتم فصل الالكترونات والثقوب الناشئة عن بعضها البعض بواسطة أنصاف نواقل معينة ــ عن طريق ممر (سطح انتقال) p/n، وجملة MIS (Metall-Isolator-Semiconductor) أي (معدن ــ عازل ــ نصف ناقل) أو عن طريق جملة SIS (Semiconductor-Isolator-Semiconductor) أي (نصف ناقل ــ عازل ــ نصف ناقل).

---

* الكمّ (Quantun) هو أصغر مقدار من الطاقة يمكن أن يوجد مستقلاً ــ المترجم

المَمَر من نوع p/n هو عبارة عن شبكة ثنائية الطبقات يتاخم فيها نصف ناقل -n (مثلاً سيليسيوم مطلي بآثار من الفوسفور) نصفَ ناقل آخر-P (مثلاً سيليسيوم مطلي بالبور) (الشكل 12.10).

في هذا المجال الحدّي، أي الممر p/n يتشكل عند التعريض للضوء حقل كهربائي داخلي. بامتصاص الإشعاع الشمسي تنفصل على جانبي الطبقة الحدية أزواج من الالكترونات والثقوب، وتنتقل الالكترونات من نصف الناقل p إلى نصف الناقل n، أما الثقوب فتنتقل من نصف الناقل n إلى نصف الناقل p، وذلك لموازنة هبوط حوامل الشحنة في الطبقة الحدّية. تحت تأثير الحقل الداخلي تجتمع الالكترونات في الناقل n والثقوب في الناقل p، وبذلك ينشأ عند سطوح التماس للمعدن على السطح الخارجي منبع توتر (جهد، ضغط) يعاكس الحقل الداخلي ويساويه. يؤدي هذا الجهد في دارة كهربائية خارجية مغلقة إلى نشوء تيار مستمر.

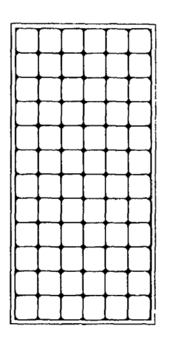


الشكل 12.10 : الخلية الشمسية مع الممر من نوع p/n.

يمكن إنتاج الخلايا الشمسية من أنصاف نواقل مختلفة ومن مركبات أنصاف النواقل. يتعلق الجهد المتولد في الخلايا الشمسية بأنواع مواد أنصاف النواقل المستعملة، وتزداد شدة التيار مع شدة الإشعاع والمساحة المعرضة للضوء، وتصل الاستطاعة الأعظمية الممكن الوصول إليها إلى W 100 لكل متر مربع من مساحة الخلية الشمسية. هذا ويتطلب الوصول إلى مردود جيد استعمال أنصاف نواقل شديدة النقادة وتستخدم حالياً في أغلب الأحيان خلايا شمسية من السيليسيوم.

الجملة الشمسية والمولد

العنصر الأساسي لمجموعة كهرضوئية PV - System هو الجملة الشمسية (الشكل 13.10). إنه الجزء الأصغر الذي يولد الطاقة الكهربائية والذي يُوصل فيه صف من الخلايا الشمسية خلف بعضها البعض، وتُجمَّع تحت غطاء شفاف كتيم للهواء بحيث تكون متينة ميكانيكياً. وهكذا يمكن الوصول إلى جهود (توترات، ضغوط) كهربائية واستطاعات عالية. يبلغ الجهد الاسمي لجملة شمسية 12 V.



الشكل 13.10 : الجملة الشمسية.

يُصنَّع المولّد ذو الخلية الشمسية أو المولّد الشمسي عن طريق وصل عدة جمل شمسية ويستخدم لتأمين الطاقة الكهربائية لمستهلك أو أكثر. عند الوصل التسلسلي لعدة جمل عن طريق ربط القطب السالب لجملة مع القطب الموجب للجملة التالية تُضرَب قيمة التوتر (الجهد) الاسمي U_n للجملة الشمسية الواحدة بعدد الجمل n وذلك عند نفس تيار الشحن I:

$$U = n\, U_n \qquad (31.10)$$

ينتج الوصل التسلسلي لجملتين كل منهما 12 V ينتج مولداً شمسياً بتوتر (جهد) 24 V.

لرفع التيار وبالتالي استطاعة مولد شمسي تُربَط عدة جمل متساوية التوتر (الجهد) الاسمي U_n على التوازي (التفرّع) (كل منها القطب السالب مع القطب السالب والقطب الموجب مع القطب الموجب). وهكذا ينتج تيار الشحن I واستطاعة المولد الشمسي كما يلي:

$$I = n\, I_n \qquad (32.10)$$

$$P = I\, U \qquad (33.10)$$

الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليسيوم

يُميَّز بين ثلاثة أنواع رئيسية من الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليسيوم، وذلك تبعاً لشكل التبلوُر (cristalization):

- الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليسيوم أحادية البلورة.
- الخلايا الشمسية المتعددة البلورات.
- الخلايا الشمسية ذات الطبقة الرقيقة أو غير المتبلورة (amorphous) (اللابلّورية).

لإنتاج النوع الأول من الخلايا الشمسية يسحب من مصهور السيليسيوم ناقل أحادي البلورات من النوع p طوله 2 إلى 3 m وقطره 10 إلى 15 cm، ثم يُقسم بالمنشار إلى شرائح سماكتها 0.3 إلى 0.5 mm. ولتشكيل الممر (سطح عبور التيار) p/n يطلى الجانب المواجه للإشعاع الشمسي بطبقة سماكتها 3 إلى 4 mm بالفوسفور. أما استجرار التيار فيتم عبر تماسات من الطبقة المعدنية (على الجانب الأمامي من الشبكة المعدنية الموصلة للتيار). ولكن ينفذ أكبر قدر من الإشعاع الشمسي فلا يجوز لمساحة الشبكة المعدنية أن تغطي أكثر من % 10 من المساحة الإجمالية. تعطي خلية سيليسيوم شمسية أبعادها 10 × 10 cm توتراً (جهداً) كهربائياً قيمته 0.5 V واستطاعة أعظمية قدرها 1 W عندما تكون شدة الإشعاع 100 W/m^2. تحاط الخلية الشمسية بغلاف من الزجاج أو البلاستيك بحيث تصبح كتيمة للهواء.

إن مردود خلايا السيليسيوم الشمسية الأحادية البلورة مرتفع نسبياً (15 إلى 18 %) وهي تستخدم في المحطات الكهرضوئية (PV) المتوسطة والكبيرة.

يشكل السيليسيوم في الخلايا الشمسية المتعددة البلورات، بلورات عديدة ذات حجوم واتجاهات مختلفة.

تقسم الكتلة التي تتألف من العديد من بلورات السيليسيوم الصغيرة إلى شرائح لاستخدامها كخلايا شمسية كما هو الحال في الخلايا الآحادية البلورة. يتراوح مردود الخلايا المتعددة البلورات بين 12 و14 % كحد أعظمي. يبين الجدول (6.11) القيم الأعظمية لمردود مجموعات خلايا السيليسيوم الشمسية.

الجدول 6.10: المردود الأعظمي لخلايا السيليسيوم الشمسية وللمجموعات الشمسية.

نوع الخلية الشمسية	المردود %	
	الخلية الشمسية	للجملة الشمسية
خلايا السيليسيوم الشمسية الأحادية البلورة	17.8	17.4
خلايا السيليسيوم الشمسية المتعددة البلورات	13.8	13.4

يحتاج تصنيع خلايا السيليسيوم البلورية الكثير من العمل والجهد، ويبلغ الزمن اللازم لتغطية كلفتها ثلاثة أعوام. تبلغ تكاليف إنتاجها 12 إلى 20 DM لكل 1 W استطاعة، وتبلغ تكاليف الطاقة الكهربائية المنتجة 0.8 إلى 1.6 DM/kWh مقابل 0.05 إلى 0.15 DM/kWh في محطات الطاقة التقليدية. أما تكاليف خلايا السيليسيوم الشمسية المتعددة البلورات فهي أقل. يتطلب ترويج خلايا السيليسيوم الشمسية البلورية في السوق تخفيض تكاليف إنتاج الطاقة الكهربائية إلى الخُمس، وذلك بتبسيط تقنية الإنتاج.

يُبخَّر السيليسيوم في الخلايا الشمسية اللابلّورية من مركب غازي مثل SiH_4 (Silan) على مادة حاملة كالزجاج ويُطلى به بنفس الوقت.

ونتيجة للتوضع غير المنتظم تماماً لذرات السيليسيوم، فإنه يتمتع بدرجة امتصاص أعلى للإشعاع الشمسي من السيليسيوم البلوري، وبذا فإن سماكة 1 m لسطوح العبور (الممرات) p/n كافية. كذلك يمكن ربط هذه الخلايا الشمسية الرقيقة على التسلسل بالتبخير على شكل جملة.

إن إنتاج الخلايا الشمسية اللابلّورية أرخص بكثير من إنتاج الخلايا الشمسية البلورية ولكن مردودها صغير، إذ يتراوح بين 5 و8 %. يمكن أن تُنتَج مثل هذه الخلايا الشمسية بحجوم مختلفة حسب الحاجة كما أن العمل والجهد المبذولين لإنتاجها وكذلك استهلاك السيليسيوم الصافي تحقق وفراً مقارنة بالخلايا الشمسية البلورية.

كذلك يمكن إنتاج الخلايا الشمسية ذات الطبقة الرقيقة من أنصاف نواقل أخرى مثل GaAs، أو CdTe أو $CuInSe_2$... الخ. عند الإنتاج بكميات كبيرة يتم الحصول بالخلايا الشمسية المصنوعة من GaAs على مردود يبلغ حوالي 20 %. يتم الوصول إلى أكبر مردود بواسطة ما يسمى بالخلايا الشمسية الترادفية (Tandem)، إذ يصل إلى ما يزيد على 30 %، وتتألف هذه الخلايا من عدة طبقات، مواد أنصاف النواقل فيها مختلفة. يكون التأثير الكهرضوئي (الفوتوفولطي) أعظمياً لمادة ما في جزء من الطيف الشمسي ولمادة أخرى في جزء آخر من الطيف. فمثلاً يكون أعظمياً لـــ

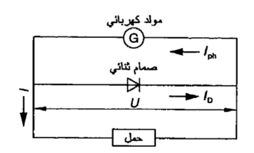
كبريت الكادميوم وللسيلينيوم (Se) في مجال الضوء المرئي، أما للسيليسيوم أو GaAs في مجال قريب من الأشعة تحت الحمراء (Infra-red). وقد أمكن في المخبر وبالاستعانة بـ GaAs/GaSb الحصول على مردود قدره 37 % (يمكن نظرياً تحقيق قيم تصل حتى 40 %).

2.3.10 المنحني المميز والمردود لجملة شمسية كهرضوئية (PV)

المنحني المميز للتيار وللتوتر (الجهد) الكهربائي

يبين الشكل (14.10) مخططاً مكافئاً لوصل بمجموعة شمسية (كذلك يمكن استخدام هذا المخطط للخلايا الشمسية والمولدات الشمسية). يستعاض بذلك عن الخلية الشمسية بمولد كهربائي وصمام ثنائي (diode) موصول به على التوازي. يتفرع تيار الضوء I_{ph} الذي يولده المولد الكهربائي إلى تيار في الدارة الخارجية I و إلى تيار في الصمام الثنائي I_D.

تتميز الدارة المكافئة بتيار الإشعاع أو الإغلاق للصمام الثنائي I_o ومقاومة الدارة التفرعية R_s) أو R_{sh}) للصمام الثنائي. إن مقاومة الدارة التفرعية R_{sh} للخلايا الشمسية الحديثة عالية.



الشكل 14.10 : المخطط المكافئ لوصل جملة شمسية.

يبين الشكل (15.10) المنحني المميز للتوتر (الجهد) ـــ التيار في خلية شمسية، وهو يمثّل تخطيطياً العلاقة بين التيار I الذي تقدمه الجملة الشمسية والتوتر (الجهد) المولّد.

عند درجة حرارة ثابتة وشدة ثابتة للإشعاع الشمسي تطبّق العلاقة التالية:

$$I = I_{sc} - I_o \,[\exp(qU/k\;T) - 1] \quad [A] \qquad (34.10)$$

حيث: I شدة التيار [A]

I_{sc} تيار القصر [A] (Short Circuit)

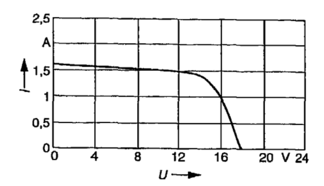
I_o تيار الإشباع (الإغلاق) للصمام الثنائي [A]

q الشحنة الأولية (العنصرية) $(1.60219 \times 10^{-19} C)$

U التوتر (الجهد) الكهربائي [V]

k ثابت بولتزمان $(1.38066 \times 10^{-23} J/k)$

T درجة الحرارة [K].



الشكل 15.10 : المنحني المميز للجهد ـــ التيار في خلية شمسية.

ينتج من المنحني المميز للتوتر ـــ التيار كلٌّ من تيار القصر I_{sc} والتوتر بدون حمل U_{oc} والاستطاعة الأعظمية P_{max} للجملة الشمسية. يوافق تيار القصر التوتر المقدم، أما التوتر بدون حمل U_{oc} فهو يمثل أعظم توتر عندما لا يسري أي تيار $(I = 0)$. ينتج من المعادلة 34.10 عندما يكون $I = 0$ ما يلي:

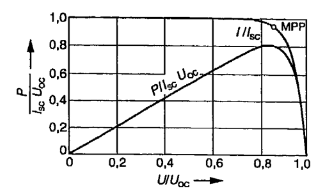
$$I_{sc} / I_o = \exp (q\, U_{oc} / k\, T) - 1 \qquad (35.10)$$

أما استطاعة الجملة الشمسية فتنتج من العلاقة التالية:

$$P = I\, U = \{I_{sc} - I_o [\exp (q\, U / k\, T) - 1]\}\, U \quad [W] \qquad (36.10)$$

يبين الشكل (16.10) المنحني المميز بشكل لا بعدي كعلاقة بين I / I_{sc} وU / U_{oc}، بالإضافة إلى منحني الاستطاعة $(P/I_{sc}U_{oc})$ للجملة الشمسية. توافق الاستطاعة الأعظمية النقطة MPP (Maximum Power Point) ذات التيار I_p والتوتر U_p. وتنطبق العلاقة $P_{max} = I_p\, U_p$، وتُعرَّف الاستطاعـــة الاسمية لجملة شمسية بأنـــها الاستطاعة عند النقطة MPP عندما يكـــون الإشعاع $1000\ W/m^2$ ودرجة الحرارة 25 °C. يتعلق المنحني المميَّز لجملة بشدة الإشعاع الشمسي، وعند شدات إشعاع منخفضة يتناقص تيار القصر وتنـــزاح النقطة MPP باتجاه التناقص القليل للتوتر.

عندما ترتفع درجة حرارة الخلية الشمسية جرّاء الإشعاع الشمسي الممتص (خصوصاً عند ارتفاع درجة حرارة الوسط المحيط) تنـــزاح النقطة MPP باتجاه التوتر الأخفض.



الشكل 16.10 : المنحني المميز لخلية شمسية مثالية.

فمثلاً عند ارتفاع درجة الحرارة من 25 °C إلى 40 °C يحصل ضياع في الطاقة، تصل قيمته في الخلايا الشمسية البلورية المصنوعة من السيليسيوم إلى 3 وحتى 5 % كل عام. تبلغ قيمة الضياع في كسب الطاقة بفعل اختلاف الإشعاع الوسطي (في وسط أوروبا 500 W/m^2) عن القيمة الاسمية ($1000\ W/m^2$) 7%.

لحساب درجة حرارة الجملة الشمسية المعرضة للأشعة، يجب إجراء موازنة حرارية لهذه الجملة الشمسية:

$$I_{sol}\,\tau\,\alpha = \eta_M\, I_{sol} + k_M\,(t_M - t_{amb}) \qquad (37.10)$$

حيث: I_{sol} شدة الإشعاع في مستوى الجملة الشمسية [W/m^2]

τ وα درجة التحويل (النقل) للغطاء الشفاف، و α درجة امتصاص الجملة الشمسية للشعاع الساقط عليها.

η_M مردود (كفاءة) الجملة الشمسية

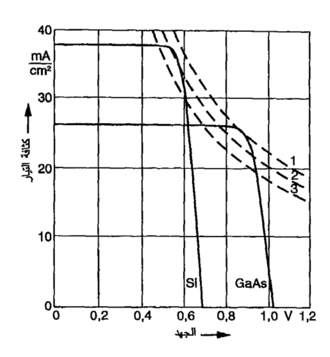
k_M عامل الضياع الحراري الإجمالي للجملة الشمسية [W/m^2K]

t_M درجة حرارة الجملة الشمسية [°C]

T_{amb} درجة حرارة الوسط الخارجي المحيط [°C]

وينتج من ذلك درجة حرارة الجملة الشمسية:

$$t_M = t_{amb} + I_{sol}\,(\tau\,\alpha - \eta_M)\,/\,K_m \qquad (38.10)$$



الشكل 17.10 : المنحنيات المميزة والمراديد (0.22 - 1، 0.2 - 2، 0.18 - 3) لأفضل خلايا شمسية مصنوعة من السيليسيوم أو GaAs.

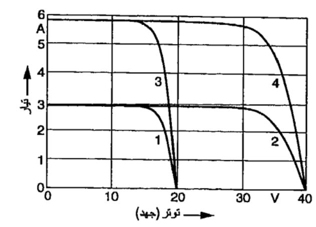
يبين الشكل (17.10) منحنيات المردود لأفضل خلايا شمسية من النوع GaAs أو السيليسيوم بالإضافة إلى المنحنيات المميزة لها. أما القيم المميزة لهاتين الخليتين الشمسيتين فهي مبينة في الجدول (7.10).

عند الوصل على التوازي للحمل الشمسية تجمع التيارات، وعند الوصل التسلسلي لها تجمع التوترات الكهربائية.

الجدول 7.10: القيم المميزة لخلية السيليسيوم الشمسية (من النوع LBSF من مادة السيليسيوم النموذج Wcm 0.5) والخلية الشمسية GaAs (النموذج p/n GaAlAs، المادة Ga As)

القيمة المميزة	الوصف (الرمز)	الواحدة	خلية السيليسيوم الشمسية	خلية GaAs الشمسية
التوتر بدون حمل	U_{oc}	mV	682	1016
كثافة تيار القصر	I_{sc}/A	mA/cm^2	37.9	26.1
درجة الملء	FF	–	0.796	0.839
المردود (الكفاءة)	η	–	20.6	22.3
المساحة	A	Cm^2	2 × 2	1 × 1

يبين الشكل (18.10) المنحني المميز للتيار — التوتر من أجل الوصل التسلسلي أو التفرعي للجمل الشمسية.



1. الجملة 55-W
2. جملتان موصولتان على التسلسل
3. جملتان موصولتان على التوازي (التفرع)
4. جمع بين 2 و 3

الشكل 18.10 : المنحنيات المميزة للجملة الشمسية.

أما الجدول (8.10) فيبين المواصفات الفنية للجملة الشمسية M 55 من صنع شركة Siemens.

الجدول 8.10: المواصفات للجملة الشمسية M55 من شركة سيمنس Siemens.

القيمة المميزة	القيمة
الاستطاعة الأعظمية P_{max},W	53
التوتر بدون حمل U_{oc},V	21.7
تيار القصر I_{sc},A	3.35
الأبعاد mm	36 × 329 × 1293
الوزن، kg	5.7

المردود

يُعرَّف مردود (كفاءة) جملة شمسية η_M بأنه نسبة الاستطاعة الكهربائية الأعظمية المنتجة P_M إلى استطاعة الإشعاع المستقبَل.

$$\eta_M = P_M / A_M I_{sol} \qquad (39.10)$$

حيث: A_M المساحة الصافية لسطح الجملة الشمسية

I_{sol} شدة الإشعاع الشمسي في مستوى الجملة الشمسية.

وتصبح الاستطاعة الكهربائية الأعظمية الممكن تقديمها:

$$P_M = I_{sc}\, U_{oc}\, FF \qquad (40.10)$$

حيث: I_{sc} تيار القصر

U_{oc} التوتر بدون حمل

FF درجة الملء.

أما حساب التوتر (الجهد) بدون حمل U_{oc} وتيار القصر I_{sc} (عند $R_s = 0$ و $R_{sh} = \infty$) فيحسبان كما يلي:

$$U_{oc} = (A_M\, k\, T / q) \ln (I_{sc} / I_o + 1) \qquad (41.10)$$

$$I_{sc} = I_{ph} \qquad (42.10)$$

حيث: I_o تيار الإشباع في الصمام الثنائي وI_{ph} التيار الضوئي المولّد في الجملة الشمسية [A].

عامل الملء هو نسبة الاستطاعة الأعظمية إلى مساحة المستطيل ذي البعدين I_{sc} وU_{oc}:

$$FF = P_M / I_{sc}\, U_{oc} \qquad (43.10)$$

لكن يتم الحصول على استطاعة ومردود أعظميين يجب أن تكون قيمة I_{ph} أعظمية وقيمة I_o أصغرية.

تحسب الاستطاعة المفيدة لجملة شمسية من الفرق بين تيار الإشعاع الشمسي الممتص وتيار الضياعات الحرارية. تتعلق ضياعات الطاقة في الجملة الشمسية بآلية التحول الكهرضوئية (PV) وهي تحصل للأسباب التالية (القيم الموجودة بين قوسين هي القيم النمطية منسوبة إلى الإشعاع الشمسي الساقط):

- لا تمتص الفوتونات الموجودة في مستوى الطاقة E الواقع تحت مستوى فجوة الطاقة E_g (تبلغ هذه الضياعات في الطاقة لخلية السيليسيوم الشمسية 24 % وفي خلية GaAs تبلغ 38 %).
- تُحوَّل طاقة الفوتونات الفائضة إلى طاقة حرارية في الشبكة المعدنية ـــ الغلاف (تبلغ هذه الضياعات في الطاقة لخلية السيليسيوم 32 % ولخلية GaAs تبلغ حوالي 19 %).
- عامل الكسب (الربح) qU_{oc}/E_g (لخلية السيليسيوم الشمسية ولخلية GaAS يبلغ حوالي 12 %).
- تبلغ الضياعات الأخرى (عامل FF، مردود التجميع، مقاومة الربط على التسلسل وضياعات الانعكاس) بمجملها حوالي 11 % في خلية السيليسيوم الشمسية و 19 % في خلية GaAs. ولهذا فإن مردود خلية السيليسيوم الشمسية يبلغ 10 إلى 12 %.

3.3.10 بنية وعناصر الوحدات الكهربائية الضوئية (PV - Systems)

الوحدات الكربائية الضوئية المنفردة والموصولة مع الشبكة

يقدم المولد الشمسي تياراً فقط عندما يتعرض للضوء، وتتعلق قيمة التيار المستمر المولّد بشدة الإشعاع. لا يمكن قبول عدم استمرار تقديم الطاقة إلا في مجالات الاستخدام البسيط (مثل مضخات الماء، الآلات الحاسبة أو الساعات) وفي مثل هذه الحالات يوصل الجهاز المراد تغذيته بالتيار مباشرة مع المولد الشمسي. يزداد أمان التغذية لمستهلك تيار مستمر بوصل المنشأة مع العناصر التالية:

- مدّخرات (بطاريات) لتخزين التيار الكهربائي
- مولدات إضافية

ولتغذية المستهلكين الذين يحتاجون إلى تيار متناوب يتم تحويل التار المستمر إلى تيار متناوب. يتم ضمان تأمين التيار عن طريق الوصل التفرعي (على التوازي) بالشبكة الكهربائية العامة.

ثمة نوعان من الوحدات الكهربائية الضوئية:

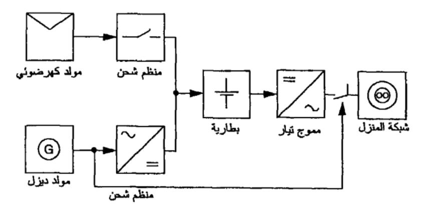
- معدات تأمين التيار الكهربائي المستقلة عن الشبكة والتي تعمل بشكل منفرد وليس لها أي اتصال بالشبكة العامة وتشكل بحد ذاتها شبكة خاصة.
- وحدة مربوطة بالشبكة العامة.

إن الوحدات المستقلة مناسبة لتزويد المستهلكين البعيدين عن الشبكة العامة كمضخات الماء وأجهزة الاتصالات (إرسال الإشارات) ومحطات القياس. وأكواخ متسلقي الجبال*... إلخ. يبين الشكل (19.10) مخطط وصل جملة مستقلة، وهي تتألف من العناصر التالية:

- مولد شمسي (كهرضوئي)
- بطارية تخزين مع منظم شحن
- مموّج تيار (يحول التيار المستمر إل متناوب)
- المجموعة الاحتياطية المؤلفة من محرك احتراق داخلي ومولدة
- شبكة التوزيع الرئيسية.

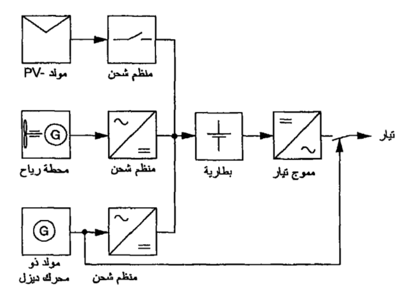
* كما هو الحال في جبال الألب في أوروبا (المترجم).

بما أن المولدات الشمسية يمكن أن تأخذ حجوماً مختلفة، فإن استطاعات الوحدات المستقلة تختلف حسب الحاجة.



الشكل 19.10 : مخطط وصل منشأة ضوئية كهربائية مستقلة (جملة الجزيرة).

إن الوحدات الضوئية الكهربائية التي توصل بشبكة الكهرباء العامة أبسط بكثير من الوحدات المستقلة. يُحوَّل التيار المستمر للمولد الشمسي عن طريق مموِّج التيار إلى تيار متناوب وثلاثي الطور حسب الحاجة يغذي المستهلك مباشرة أو يغذي الشبكة العامة. ولما كانت الشبكة العامة تعتبر خزاناً كبيراً للطاقة، فهي قادرة على تلقي الطاقة المولدة الفائضة أو تغطية النقص.



الشكل 20.10 : مخطط وصل منشأة هجينة (عدة مصادر توليد) لتأمين التيار الكهربائي مؤلفة من وحدة ضوئية كهربائية (PV)، ومولد تيار للطوارئ (محرك ديزل ومولد)، ومحطة رياح.

يمكن ربط وحدات -PV مع منشآت توليد طاقة أخرى مثل محطات التدفئة وتوليد الكهرباء ومجموعات الطوارئ لتوليد الكهرباء ومحطات الرياح. يبين الشكل (20.10) مخطط وصل محطة هجينة (hybrid). يتم توليد الطاقة الكهربائية في مولد شمسي أو في محطة رياح أو بواسطة محرك ديزل مع مولدة. تصبح المنشأة كاملة بإضافة بطارية تخزين ومموّج للتيار وشبكة للتوزيع. كما يبين الجدول (9.10) المواصفات الفنية لهذه المنشأة.

الجدول 9.10: المواصفات الفنية للمنشأة الهجينة لتأمين الكهرباء لمحطة معالجة مياه المجاري (في ألمانيا).

الوصف	القيمة
1. مولد PV من النوع PQ10/40	40 قطعة
39 متعدد البلورات	
الاستطاعة الأعظمية	kW 140
2. مموّج تيار	اثنان كل منهما kVA 80
3. محطة الرياح	
الاستطاعة الاسمية	250kW
الدوّار (rotor)	ثلاث شفرات بقطر m25، مادة الأجنحة GFK
ارتفاع البرج	m 27.3
4. محطة التدفئة وتوليد الكهرباء	محرك M102- Daimler-Benz
الاستطاعة الإسمية	kW 30 (كهربائية) وkW 60 (حرارية)
الوقود	غاز حيوي (biogas)

الجمل الشمسية

يجري في الجمل الشمسية تحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية، وهي تتألف من عدة خلايا شمسية متصلة مجمعة ضمن مادة بلاستيكية مرنة. لحماية الجملة الشمسية من التاثيرات الخارجية يوضع على وجهها الأمامي غطاء زجاجي شديد الشفافية وعلى الجانب الخلفي توضع علبة وصل كتيمة ضد الماء. أما الإطار فهو مصنوع من الألومنيوم المقاوم للصدأ.

المواصفات الكهربائية لجملة شمسية هي الاستطاعة العظمى P_{max}، تيار القصر I_{sc}، توتر (جهد) العمل بدون حمل U_{oc} بالإضافة إلى التيار I والتوتر (الجهد) في حالة التحميل.

على سبيل المثال فإن المواصفات الفنية للجملة الشمسية M 55 ذات خلايا السيليسيوم الشمسية التي عددها 36، إنتاج شركة سيمنس كما يلي:

$U = 17.4$ V ،$I = 3.05$ A ،$U_{oc} = 21.7$ V ،$I_{sc} = 3.4$ A ، $P_{max} = 53$ W

أما الأبعاد والوزن فهي:

5.7 kg و 1293 × 330 × 36 mm

تتكون الجملة الشمسية المؤلفة من خلايا ذات الطبقة الرقيقة من حامل زجاجي،وخلايا شمسية غير منتظمة (لابلّورية) تتوضع على طبقة أوكسيد الزنك الجيدة الناقلية بالإضافة إلى غطاء زجاجي، وعلى الجانب الخلفي ثمة طبقة ناقلة وتماسات كهربائية مع مرس كهربائي (كابل). تحاط هذه الجملة بإطار بلاستيكي (PUR) يغلفها.

للجملة الشمسية ذات الطبقة الرقيقة T 25 الأبعاد التالية 23 mm × 365 × 1321، ومواصفاتها الفنية كما يلي:

.$U = 15$ V ،$I = 1.7$ A ،$U_{oc} = 23$ V ،$I_{sc} = 2.1$ A ،$P_{max} = 25$ W

المدخرات (البطاريات)

تتعلق استطاعة الطاقة الكهربائية المولدة بالمولد الشمسي مباشرةً بشدة الإشعاع الشمسي، ولكن استهلاك الطاقة يختلف عادةً عن مقدار الطاقة المتاحة. لموازنة هذه الفروق تستخدم بطارية تخزين. تتلقى البطارية فائض الطاقة الكهربائية في أوقات ارتفاع شدة الإشعاع الشمسي وتخزنها ثم تعيدها ثانية إلى المستهلك في أوقات انخفاض شدة الإشعاع الشمسي.

تستخدم في منشآت -PV التي تزيد استطاعتها على W 10 مدخرات رصاصية، تتألف من سلسلة من صفائح الرصاص في خزان يحوي حمض الكبريت الممدد. عندما تكون المدخرة مشحونة يكون القطب السالب من الرصاص والقطب الموجب من أوكسيد الرصاص. تستخدم للأجهزة الصغيرة بطاريات قابلة للشحن ثانية مصنوعة من النيكل والكادميوم (Ni-Ca).

وتبعاً لاستطاعة المستهلك المطلوبة تقع سعة مدخرات التخزين السائدة الاستعمال بين 40 و Ah 280. تتألف دورة المدخرة من عملية شحن وعملية تفريغ. تُنسَب السعة الاسمية لمدخرة C إلى فترة تفريغ محددة t_e ذات تيار تفريغ محدد I_e.

من أجل الطاقة التي تستطيع المدخرة تخزينها بتوتر U تنطبق العلاقة:

$$E_{sb} = C\,U = I_e\,t_e\,U \quad [\text{Wh}] \qquad (44.10)$$

على سبيل المثال تخزن بطارية سعتها 200 Ah توتراً قدره 12 V وقدرةً 2400 Wh = 12 × 200.

ولضمان العمر الأطول (5 أعوام) للمدخرة يجب تجنب حالات زيادة الشحن أو تناقصه الشديد (تفريغ المدخرة).

يبلغ التوتر الاسمي لمدخرة رصاصية 2 V لكل خلية. ويمكن الحصول على السعة المطلوبة والتوتر للمدخرة عن طريق الوصل التسلسلي أو التفرعي. تتألف المدخرة 12 V من 6 خلايا موصولة على التسلسل ومتوضعة في علبة. والبطاريات الكبيرة ذات 6 V تحوي ثلاث خلايا فقط. من أجل سعة أكبر من 200 Ah تستخدم خلية واحدة.

يقوم منظم الشحن للمدخرة بعملية وقايتها من زيادة الشحنة لتجنب توتر تصاعد الغازات (gasing) ولتحاشي التفريغ الشديد إلى ما دون حدود معينة (مثلاً 10.5 V) والوقاية من التيار العكسي وذلك لتفادي سريان تيار من البطارية إلى الجملة الشمسية عند حلول الظلام.

يُستخدَم محول التوتر لتشغيل أجهزة ذات توترات أخرى. تستخدم في الأجهزة ذات التيار المستمر محولات التوتر المستمر (محول DC/DC) بمردود 80 %. أما أجهزة التيار المتناوب فيمكن وصلها عبر مموّج تيار بمردود 70 إلى 85 % في مدخرة ذات 12 V أو 24 V.

لضمان توفير التغذية الكهربائية بشكل أفضل يستخدم إلى جانب منشأة -PV مجموعة توليد مؤلفة من محرك احتراق داخلي ومولدة تقوم بتوفير التيار اللازم وبشحن المدخرة.

4.3.10 تصميم المنشأة الكهرضوئية (PV)

موازنة الطاقة

لموازنة الطاقة في منشأة PV مستقلة، تتألف من مولد شمسي، ومنظم (مموّج Inverter)، ومدّخرة ومولد مع محرك ديزل وحمولة وذلك عبر فترة استخدام معينة تنطبق العلاقة:

$$E_G + E_{sb} + E_D - E_v = E_L \quad [J] \qquad (45.10)$$

حيث: E_G الطاقة الكهربائية المولّدة من المولد الشمسي

E_{sb} الطاقة المحولة في المدخرة

E_D الطاقة الكهربائية المستجرة من مولد محرك الديزل

E_{los} الاستهلاك الذاتي للطاقة وضياعات الطاقة للمنظم والمدخرة.

E_L الطاقة الكهربائية المستهلكة (الحمولة).

تستخدم المعادلة (45.10) لحساب الاستطاعة المقابلة P. تحسب كميات الطاقة بالمكاملة للاستطاعات الموافقة خلال الأوقات المقابلة t.

وبالتالي فالطاقة المقدمة من قبل المولد الشمسي خلال الفترة t هي:

$$E_G = A_G I_{sol} \eta_G t \quad [J] \qquad (46.10)$$

حيث: A_G مساحة سطح الخلايا الشمسية الإجمالية $[m^2]$

I_{sol} شدة الإشعاع الشمسي الآنية أو الوسطية $[W/m^2]$

η_G المردود الآني أو الوسطي للمولد الشمسي

T الفترة الزمنية [s].

يراعي المردود η_G للمولد الشمسي بالإضافة إلى ضياعات التحويل في منشأة PV، ضياعات طاقة الإشعاع الشمسي إلى الوسط المحيط.

تُحسَب سعة تخزين الطاقة للمدخرة مقدرة بالواط الساعي عن طريق العجز (النقص) في الطاقة الكهربائية الذي يمكن أن ينشأ خلال فترة تصميمية محددة.

ويُحسَب حجم المولد الشمسي بدون ادخار طاقة عن طريق معرفة استهلاك الطاقة خلال فترة تفريغ محددة.

مساحة سطح الخلايا الشمسية

يستخدم لتحديد فترة التصميم t (عمر الخلية الشمسية) مدة الاستقلال الذاتي t_a (الفترة الزمنية التي تتكرر بعدها عملية توليد الطاقة للمولد الشمسي واستهلاكها). تُحسَب المساحة اللازمة للخلايا الشمسية من أجل قيمة معينة لـ t_a ولاستهلاك معين للطاقة (E_L) كما يلي:

$$A_G = E_L / \eta_G I_{sol} t_a \quad [m^2] \qquad (47.10)$$

كسب الطاقة السنوي

لحساب الإنتاج السنوي للطاقة في منشأة -PV ندخل مفهوم عامل الجودة Q:

$$Q = P_a / P_n \qquad (48.10)$$

حيث: P_a الاستطاعة الفعلية الوسطية لمنشأة -PV وP_n الاستطاعة الاسمية.

ويبين الجدول (10.10) قيم Q.

لحساب الكسب السنوي للطاقة تستخدم العلاقة التالية:

$$E_{el} = E\,Q\,P_{max} / I_{sol} \quad [kWh/a] \qquad (49.10)$$

حيث: E المجموع السنوي للإشعاع الإجمالي على $1\ m^2$ من سطح المولد الشمسي $[kWh/m^2a]$

Q عامل الجودة

P_{max} الاستطاعة الأعظمية للمولد الشمسي الكهربائي [kW]

I_{sol} شدة الإشعاع الشمسي عند الشروط الاسمية أي $1\ kW/m^2$.

الجدول 10.10: عوامل الجودة للأنواع المختلفة من المنشآت الضوئية الكهربائية وعناصرها.

العناصر/ الجملة	Q
الجملة الشمسية، المولد الشمسي، منشآت -PV المستقلة	0.88- 0.8
ــ بدون مولد إضافي	0.4-0.1
ــ مع مولد إضافي	0.6-0.4
المنشأة التي توصل بالشبكة	0.73-0.6

تصل قيم الكسب في الطاقة إلى ذروتها في المنشآت الضوئية (منشآت -PV) الموصولة بالشبكة.

كذلك يجب مراعاة الضياعات الحرارية التالية: ضياعات المواءمة أثناء تغليف الجملة الشمسية والضيـــاعات الأومية الحرارية في التمديدات (الكوابل) والضياعات في المنظمات (كل منها تبلغ 2%)، والضياعات في مموّجات التيار (10 إلى 15 %).

يتراوح الإنتاج السنوي للطاقة في منشأة PV ذات خلايا سيليسيوم شمسية، منسوبة إلى kW 1 للاستطاعة الأعظمية، بين حوالي 1000 kWh/a لكل kW في الشمال (في مدينة هامبورغ الألمانية) و1120 kWh/a لكل kW في الجنوب (Weihenstephan).

5.3.10 الاستخدام والاعتبارات الاقتصادية

حجم الإنتاج باستخدام منشآت PV

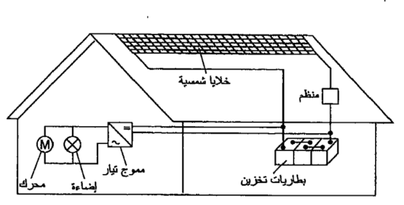
بلغ حجم الإنتاج العالمي المتاح عام 1990 باستخدام منشآت PV مقدار MW 67.6، منها MW 48 في البلدان الصناعية و19.6 MW في البلدان النامية. أما الإنتاج العالمي لمنشآت PV فقد بلغ MW 49، والاستطاعة الكلية الـــمركبة MW 46.5، منها MW 17.7 في البلدان الصناعية و MW28.8 في البلدان النامية. وبيع عام 1991 في العالم من المولدات الشمسية ما استطاعته MW20،

منها 40 % من الصناعة الأمريكية (USA) واليابانية 33 %، والأوروبية 19 %، ومن الصناعة الألمانية 7 %.

تختلف مجالات استخدام PV بحسب الاستطاعة، والوصل بالشبكة والغرض من الاستخدام. تغطي جمل PV المستقلة والموصولة بالشبكة العديد من الاستخدامات بدءاً من الأجهزة الصغيرة (الخلايا الشمسية اللابلّورية في الآلات الحاسبة والساعات) حتى مجال الاستطاعات الصغيرة وصولاً إلى مجالات الاستطاعة المتوسطة التي تبلغ 50 W حتى 5 kW ومن 100 kW حتى بضعة ميغاواط. تستخدم منشآت PV المستقلة التي تتراوح استطاعتها بين 50 و5 kW للمشاريع المستقلة (البيوت، محطات، الإرسال والإذاعة، الإنارة، مضخات الماء... إلخ).

تحتاج منشآت PV المركبة على السقف لأجل التغذية اللامركزية (المحلية) للمنازل السكنية استطاعة تبلغ 1 حتى 5 kW. يمكن استخدام منشآتPV في البلدان ذات السطوع الشمسي الطويل (جنوب أوروبا مثلاً)، وفي مجال الزراعة لتأمين مياه الشرب وللري والتبريد وتزويد القرى بالكهرباء... إلخ.

تم في الولايات المتحدة ومنذ عام 1983 إنشاء وتوسيع عدة منشآت PV (قسم منها بالاعتماد على الجمل الشمسية ذات المرايا الدوارة)، ويمكن اعتبارها وفقاً لاستطاعـــتها ـــ مُخطّط حتى 100 MW ـــ محطات توليد كهرباء بالطاقة الشمسية. أنشئت في عام 1984 منشأة PV في Carrisa Plains (كاليفورنيا ـــ USA) تحوي 754 مرآةً دوارة عاكسة يتألف كل منها من 100 m² من الخلايا الشمسية وباستطاعة أعظمية قدرها 6.5 MW. ومن المزمع توسيعها لتصبح اســـتطاعتها 16 MW باستخدام الخلايا الشمسية الترادفية (tandem).



الشكل 21.10 : تغذية منـــزل بالتيار الكهربائي باستخدام المنشأة PV.

تزود هذه المحطة الموصولة بالشبكة العامة 2300 منـــزلاً بالتيار الكهربائي.

أما في البلدان الصناعية الفقيرة بالشمس فتستخدم المولدات الشمسية للبيوت البعيدة المنعزلة (للإنارة والبرّاد والعدة والراديو) وكذلك للقوارب، والمنارات وأجهزة الإرسال العائمة وإشارات المرور وأنفاق المرور. أما في البلدان النامية فتستخدم المولدات الشمسية بالدرجة الأولى لمضخات المياه وللمشافي (الإنارة ـــ التلفون)، وللقرى وللمزارع (تشغيل أجهزة التبريد) ولتحلية المياه ولإشارات المرور، ويبين الشكل (21.10) تغذية بيت مستقل بالتيار الكهربائي. تبلغ استطاعة مولد شمسي في ألمانيا 300 kW وهو موجود في جزيرة تقع شمال ألمانيا (Pellworm).

تغذية مضخات الماء بواسطة الخلايا الشمسية

إن مجال استخدام الخلايا الكهرضوئية لتشغيل مضخات الماء يغطي المجال الواقع بين المضخات اليدوية والمضخات ذات محرك الديزل. عادة تكون الاستطاعة القصوى للمولد الشمسي في هذه الأحوال بين بضع عشرات الواط و10 kW. يكون التدفق للماء ضمن المجال من 1 حتى 40 m^3/h وارتفاع الضخ بين 2.5 و120 m. تعمل عادة هذه المنشآت بتوتر PV بدون مدخرات، وفقاً للمضخة المغذاة يكون توتر التيار المستمر بين 12 و560 V والتيار المتناوب بين 60 و380 V، ويمكن استخدام الأنواع المختلفة من المضخات (غاطسة، عائمة، ذات محور أسي، ذات امتصاص ذاتي).

كذلك يمكن، أسوةً بالمجمعات الشمسية، تركيب المولدات الشمسية بطرق مختلفة (على السقف، على حوامل، المرايا الدوارة العاكسة... إلخ). ينبغي تجنب ارتفاع درجة الحرارة دوماً تحاشياً لضياعات الاستطاعة غير المبررة. يمكن ربط منشأة PV لتأمين التيار الكهربائي بشكل مشترك مع منشأة شمسية لتأمين الماء الساخن في جملة لا مركزية (محلية).

اقتصادية جمل PV

بسبب شدة الإشعاع المنخفضة وانخفاض مردود الخلايا الشمسية فإن السطح اللازم كبير. لموازنة توزع الأشعة الساقطة فإن من الضروري تخزين الطاقة في معظم الاستخدامات.

إن ارتفاع تكاليف التركيب لمنشآت PV تجعل التكاليف الاستثمارية لهذه المنشآت تبلغ 15 إلى 27 DM لكل واط من الاستطاعة الأعظمية. أما تـــكاليف إنتاج الكهرباء فتقع حالياً بين 1.2 DM/kWh لمنشآت PV الموصولة بالشبكة والتي استطاعتها 20 kW وإلى حوالي 4.5 DM/kWh للمنشآت ذات المدخرات التي استطاعتها 0.5 kW.

زمن اهتلاك الطاقة (energy amortisation) لمنشأة PV هو الزمن اللازم لإنتاج الكمية من الطاقة التي تغطي الطاقة التي صرفت عند صنع المنشأة وتركيبها، وهي تتراوح بين أربع وسبع سنوات لخلايا السيليسيوم البلورية وبين 3 و 5 سنوات للخلايا الشمسية اللابلّورية. عامل (الإنتاج) لمنشأة PV هي النسبة بين كمية الطاقة الإجمالية المولدة طول عمرها إلى الطاقة المستهلكة في صنعها وتركيبها.

إن الحاجة إلى المنشآت ذات الخلايا الشمسية لتوليد الكهرباء كبيرة على مستوى العالم، وهي قابلة للاستخدام في تأمين الطاقة المحلية للمشاريع البعيدة المعزولة وفي المناطق المناخية المختلفة. ولكن بسبب التكاليف العالية فإن التوليد المركزي للكهرباء في محطات توليد الكهرباء الشمسية سيظل ولفترة طويلة قادمة غير اقتصادي.

محطات توليد الكهرباء على الأقمار الصناعية والليزر الشمسي (SOLASER)

التصورات المستقبلية هي استخدام محطات توليد الكهرباء على الأقمار الصناعية والليزر الشمسي. سيتم في محطات الكهرباء الفضائية توليد الكهرباء بطريقة PV على أقمار صناعية في الفضاء وعلى مدار الأرض بواسطة مولدات شمسية ذات مساحات كبيرة. سيتم تحويل الطاقة المولدة إلى طاقة موجات قصيرة جداً (micro wave) وستُرسَل إلى الأرض حيث ستستقبلها هوائيات مساحتها بضع كيلو مترات مربعة. أما في مشروع الليزر الشمسي (SOLASER) فسيتم وضع ليزر غازي هائل في مدار الأرض. تُحوَّل الأشعة الشمسية المركزة بواسطة المرآة عن طريق الليزر إلى طاقة ذات موجة وحيدة الطول. وسترسل استطاعة قدرها 100 MW في حزمة إشعاعات قطرها 20 إلى 100 m إلى الأرض.

مثال 4.10

كم يجب أن تكون مساحة سطح المولد الشمسي لمحطة كهرباء قمر صناعي استطاعتها P_{el} = 100 MW؟

مردود التحويل المباشر للطاقة الشمسية إلى تيار كهربائي هو $\eta = 11\ \%$.

الحل

تسقط على مولدات الأقمار الصناعية إشعاعات خارج الأرض (extraterrestrial) التي تبلغ شدتها الوسطية قيمة مساوية للثابت الشمسي $I_{sc} = 1367\ W/m^2$

فالمساحة اللازمة للمولد الشمسي تنتج كما يلي:

$$A = P_{el} / \eta_{Isc} = 10^8 \text{ W} / (0.11 \times 1367 \text{ W/m}^2)$$

$$= 665026 \text{ m}^2$$

11 الطاقة المائية، طاقة الرياح، طاقة باطن الأرض الحرارية، الكتلة الحيوية

1.11 محطات التوليد الكهرمائية*

مساهمة المحطات المائية في توليد الكهرباء

يصل الاحتياطي العالمي لطاقة المياه الجارية على الأرض ما يعادل توليد طاقة كهربائية مقدارها 36×10^{12} kWh في العام الواحد، أما الطاقة التي يمكن الاستفادة منها فهي تعادل حوالي 11×10^{12} kWh/a. ويُولّد في الوقت الحاضر بواسطة المحطات المائية 2.04×10^{12} kWh كهرباء سنوياً (عام 1987). بلغت مساهمة المحطات المائية في توليد الكهرباء عام 1984 كما يلي: في النرويج 99.7 %، البرازيل 94 %، كندا 66 %، النمسا 69 %، سويسرا 62 %، الولايات المتحدة (USA) 13 %، الاتحاد السوفيتي السابق 14 %، ألمانيا 4.6 %.

الاستطاعة المفيدة

تُستثمر في المحطات المائية الطاقة الحركية للماء، والتي تنشأ من الطاقة الكامنة للموقع عند جريان المياه بين ارتفاعات مختلفة. تتعلق الاستطاعة المفيدة للمحطة المائية: بتدفق الماء في العنفة وبارتفاع السقوط ويصبح:

$$P_u = g\,V\,\rho\,H\,\eta_T\,\eta_G\,\eta_{Tr} = g\,V\,\rho\,H\,\eta_e \quad [W] \qquad (1.11)$$

حيث: g التسارع الأرضي ($9.81\ m/s^2$)

V التدفق الحجمي للماء في العنفة [m^3/s]

* Hydro Power Plants — المترجم

ρ الكتلة النوعية للماء [kg/m³]

H ارتفاع السقوط المجدي [m]

η_T مردود العنفة (0.95-0.85)

η_G مردود المولد (0.99-0.95)

η_{Tr} مردود المحوّلة (0.98-0.92)

η_e المردود الفعّال للمحطة المائية.

وتبعاً للاستطاعة P_u ثمة محطات صغيرة (حتى 10 kW) ومتوسطة (حتى 100 MW) وكبيرة (فوق 100 MW). أكبر ثلاث محطات مائية في العالم هي: محطة Itaipu في البرازيل/الباراغوي باستطاعة 12.6 GW، محطة Grand Coulee في الولايات المتحدة الأمريكية باستطاعة 10.83 GW، محطة Guri في فنـــزويلا باستطاعة 10.3 GW. تقسم المحطات المائية إلى: محطات ذات ضغط منخفض، وفيها يصل ارتفاع السقوط إلى 10 m ومحطات ذات ضغطٍ عالٍ يكون ارتفاع السقوط فيها أكبر من 100 m.

مثال 1.11

ما هي الاستطاعة المفيدة لعنفة بلتون (Pelton) عندما يكون تدفق الماء الحجمي $V = 70\ m^3/s$ والمردود الفعلي $\eta_e = 0.82$؟

يُساق الماء من ارتفاع $H = 300\ m$ إلى العنفة. الكتلة النوعية للماء $\rho = 1000\ kg/m^3$.

الحل

تحسب الاستطاعة المفيدة للعنفة وفق المعادلة 1.11 كما يلي:

$$P_u = g\, V \rho H \eta_e$$

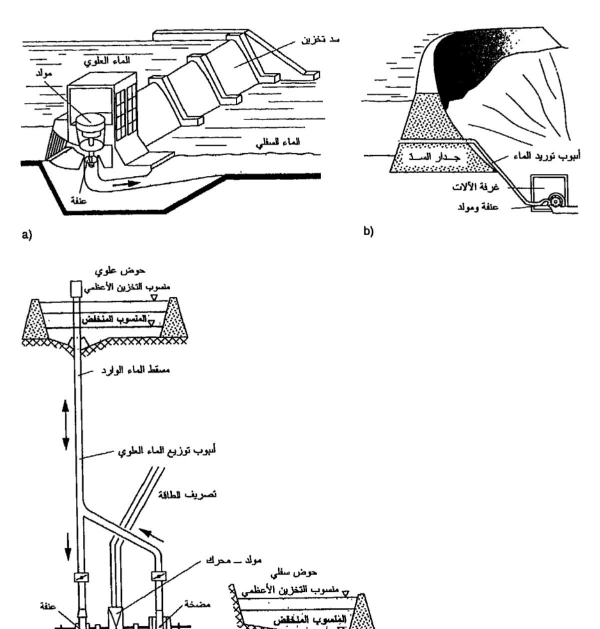
$$= 9.81\ m/s^2 \times 70\ m^3/s \times 1000\ kg/m^3 \times 300\ m \times 0.82 = 168.9\ MW$$

أنواع المحطات المائية

تقسم المحطات المائية إلى: محطات المياه المنسابة (الجارية) ومحطات المياه المخزنة والمحطات ذات التخزين بالضخ (Pumped-Storage Power Plants).

والشكل (1.11) من a إلى c يبين مبدأ عمل هذه المحطات.

تُنشأ محطات المياه الجارية على الأنهار أو الجداول (الأنهار الصغيرة) وتتميز بكميات مياه كبيرة، ولكن ذات الانحدار القليل.



الشكل 1.11 : مبدأ عمل: (a) محطات المياه الجارية، (b) محطات المياه المخزنة، (c) المحطات ذات التخزين بالضخ.

تمتاز محطات المياه المخزنة بالتدفقات القليلة للماء وبفروق الارتفاع الكبيرة جداً والتي تتحقق بواسطة بحيرات وتتشكل خلف السدود، حيث تستطيع بحيرة السد تخزين الماء خلال فترات طويلة. تستخدم المحطات الكهرمائية ذات المياه المخزنة لتغطية حمولات الذرة وكذلك للحمولة الأساسية.

إن تخزين الطاقة الكامنة للماء هو الطريقة الأنسب من ناحية التكاليف والأكثر رفقاً بالبيئة إذا أريد تخزين الطاقة. أما المحطات ذات التخزين بالضخ فتستخدم لتغطية حمولات الذروة وكاحتياطي آني لتوليد الكهرباء (عند خروج محطة توليد كهرباء حرارية تغطي الحمولة الأساسية من الخدمة)، إذ أن زمن وصلها وتشغيلها قصير لا يتجاوز الدقيقة الواحدة.

محطات المياه المخزنة والمحطات ذات التخزين بالضخ هي منشآت ذات ضغطٍ عالٍ.

يبين الجدول (1.11) معطيات الاستطاعة لأكبر محطات المياه المخزنة في العالم.

الجدول 1.11: معطيات الاستطاعة لأكبر محطات المياه المخزنة في العالم.

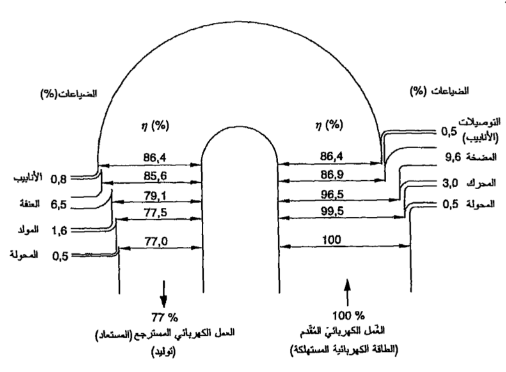
المحطة المائية	الاستطاعة [MW]
Itaipu (البرازيل، نهر Parana)	12600
Grand Coulee (الولايات المتحدة، نهر كولومبيا)	10830
Guri (فنـــزويلا، نهر Caroni)	10300
Sajano-Schuschenskaja GES (روسيا، نهر Jenissei)	6400
krasnojarskaja GES (روسيا، نهر Jenissei)	6000

تتألف المحطة ذات التخزين بالضخ من عدة مجموعات عنفات ومعدات ضخ وأنابيب الضغط المرتفع وحوضين للتخزين (حوض علوي وآخر سفلي). يتراوح ارتفاع السقوط في محطات التخزين بالضخ العاملة في الوقت الحاضر في العالم بين 50 و1120 m. تستخدم الطاقة الكهربائية الفائضة والمولدة في محطات تغطية الحمولة الأساسية في أوقات انخفاض الحمولة لضخ الماء إلى الحوض العلوي، ولتغطية حمولة الذروة تستخدم الطاقة الكامنة للماء المخزن في توليد الكهرباء في مجموعة العنفة. يبين الشكل (c1.11) أحد أشكال طريقة بناء محطة مائية ذات التخزين بالضخ. تستخدم في هذه الطريقة لبناء المحطة (التقليدية) آلتان منفصلتان هما العنفة والمضخة حيث تركبان على نفس المحور مع الآلة التزامنية (Syrchronous machine) التي تعمل كمولد أو محرك. هناك نوعان آخران من المحطات المائية ذات التخزين بالضخ. بعكس النوع الأول تستخدم هنا عنفة ـــ مضخة قَلُوبة (عكوسة) مع الآلة التزامنية.

الجدول 2.11: معطيات الاستطاعة لمحطات مختارة ذات تخزين بالضخ.

المحطة	الاستطاعة[MW] العنفات	المضخات	ارتفاع السقوط [m]	عدد المجموعات
(USA) Bath Country	2100	2280	360	6
(USA) Ludingtow	1755	1910	110	6
Dinorwig (بريطانيا)	1620	1800	535	6
(USA) Raccoon	1530	1600	320	4
Shinu Takase-gawa (اليابان)	1280	1320	265	4
Grand Maison (فرنسا)	1220	1260	955	8
Oku-Toshino (اليابان)	1210	1280	515	6
Zakorsk (روسيا)	1200	1250	1120	6
Piastra (إيطاليا)	1280	1430	1070/610	9
Wehr/Hornberg (ألمانيا)	960	1040	660	4

يبين الجدول (2.11) المواصفات المتعلقة باستطاعة المحطات المائية ذات التخزين بالضخ الأكبر في العالم.

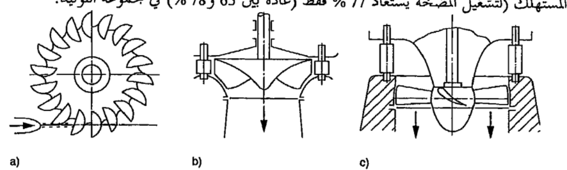


الشكل 2.11 : مخطط تدفق الطاقة لمحطة الطاقة المائية ذات التخزين بالضخ.

يصل مردود المحطة المائية ذات التخزين بالضخ، أي النسبة بين الطاقة الكهربائية التي تم كسبها والطاقة الكهربائية المستخدمة، إلى 75 % وأكثر.

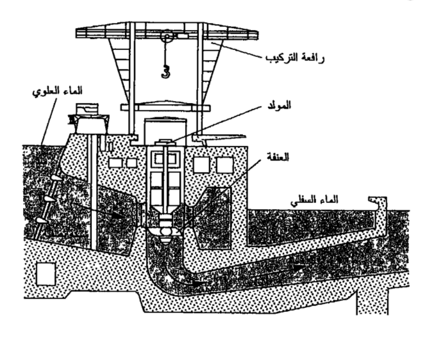
في ألمانيا تبلغ استطاعة المحطات المائية ذات التخزين بالضخ GW 2.65.

يبين الشكل (2.11) مخطط تدفق الطاقة لمحطة الطاقة ذات التخزين بالضخ. من العمل الكهربائي المستهلك (لتشغيل المضخة يستعاد 77 % فقط (عادة بين 65 و78 %) في مجموعة التوليد.



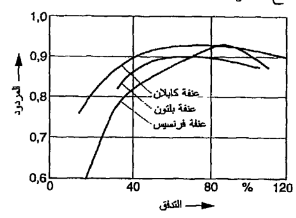
الشكل 3.11 : رسم تخطيطي لأنواع العنفات المائية (a) العفنة المماسية (عنفة بِلتون)، (b) العنفة القطرية (عنفة فرنسيس)، (c) العنفة المحورية (عنفة كابلان).

أنواع العنفات المائية المستخدمة مبينة في الشكل (3.11) بشكل تخطيطي. تصنع العنفات المماسية (عنفات بلتون) لارتفاعات السقوط بين 300 و2000 m وللاستطاعة حتى MW 300. أما العنفات القطرية (عنفات فرنسيس) فتستخدم لارتفاعات السقوط من 40 حتى m 700 والاستطاعة حتى MW 1000 وبقطرٍ للدولاب الدوار يصل إلى m 11. أما العنفات المحورية (عنفات كابلان) فتنفّذ من أجل استطاعات حتى MW 200.



الشكل 4.11 : مقطع في محطة مياه جارية ذات عنفات كابلان.

ويبين الشكل (4.11) مقطعاً في محطة مياه جارية ذات عنفة كابلان، أما الشكل (5.11) فيبين تغير مردود العنفات المائية مع الحمولة.



الشكل 5.11 : تغيـــر المردود مع تدفق الماء (a) العنفة المماسية (بلتون)، (b) العنفة القطريـــة (فرنسيس)، (c) العنفة *المحورية (كابلان).*

وفي المحطات المسماة بـــ "الجليدية" يُستخدم الماء المتجمد المخزن لتوليد الكهرباء، وتقدر الطاقة الكامنة الممكن الاستفادة منها في العالم بهذه الطريقة بين 0.1 و4.10^{12} kWh/a.

2.11 محطات توليد الكهرباء باستخدام طاقة الرياح (محطات الرياح)

استطاعة الريح في واحدة المساحة (كثافة استطاعة الريح)

طاقة الرياح هي الطاقة الحركية لجريان الهواء، واستطاعة الريح في واحدة المساحة p_w (كثافة الاستطاعة) هي:

$$p_u = P / A = {}^1/_2\, g_a\, w^2 = {}^1/_2\, \rho_a\, w^3 \quad [W/m^2] \qquad (2.11)$$

حيث: P استطاعة الريح

A المساحة المرجعية (عمودية على اتجاه الريح) [m^2]

g_a كثافة التدفق الكتلي للهواء لكل m^2 من المساحة المرجعية [kg/m^2s]

w سرعة الريح [m/s]

ρ_L الكتلة النوعية للهواء [kg/m^3].

تزداد سرعة الريح مع الارتفاع عن سطح الأرض، وعند سرعات وسطية للريح 3 أو 6 أو 9 m/s (مقاسةً على ارتفاع 10 m عن سطح الأرض) تبلغ كثافة الطاقة p_a القيم 16.27 أو 130.14 أو 439.22 W/m². هذه القيم تقابل كتلة نوعية للهواء $\rho_a = 1.205$ kg/m³ عند الدرجة 20°C والضغط 1.013 bar.

ونظراً للقيمة المتدنية لكثافة الطاقة فإن المساحات اللازمة لإنشاء محطات الرياح تكون كبيرة. تستخدم محطات الرياح فقط في المواقع ذات السرعة العالية للهواء على مدار العام w. في ألمانيا تتمتع المناطق القريبة من الشاطئ (شمال ألمانيا) بسرعة رياح w أكبر من 6 m/s. وفي الجبال الوسطى (أعلى من 1000 m) تتراوح قيمة w بين 4 و5 m/s . ومنذ عام 1992 فقد تم في ولاية (Brandenburg) تركيب أكثر من مئة محطة رياح.

أنواع محطات الرياح

يبين الشكل (6.11) أنواع محطات الرياح بشكل تخطيطي مبسط.

تتألف محطة الرياح الحديثة (وفقاً للشكل 7.11) ذات المحور الأفقي من عنفة هوائية ذات ثلاثة أجنحة (شفرات) أو جناحين (دوّار rotor) مع مولد ومحور وعلبة سرعة وتجهيزات للتحكم والتشغيل.

تقسم محطات الرياح وفقاً لاستطاعتها إلى الفئات التالية:

- محطات الرياح الصغيرة التي استطاعتها 10 إلى 50 kW وقطر دوّارها (rotor) 1 إلى 6 أمتار.
- محطات الرياح المتوسطة، استطاعتها 50 إلى 500 kW وقطر دوّارها (rotor) 16 إلى 50 m.
- محطات الرياح الكبيرة، استطاعتها 500 إلى 5000 kW وقطر الدوّار 50 إلى 130 m.

ويتراوح ارتفاع البرج بين قيمة قطر الدوار وضعفها. وأكبر محطة رياح في أوروبا تعمل الآن في الدانمارك (Tjaereborg) واستطاعتها الكهربائية 2MW وقطر دوّارها 60 m.

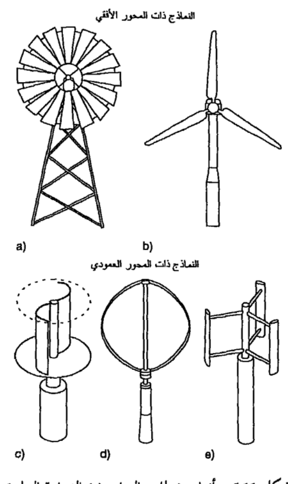
تحديد استطاعة العنفة الهوائية

من معادلة العمل المتواصل (Continuity equation) فإن التدفق الكتلي للهواء عبر عنفة هوائية من أجل جريان غير قابل للانضغاط (أي باعتبار الكتلة النوعية للهواء مقداراً ثابتاً $\rho_a = const$):

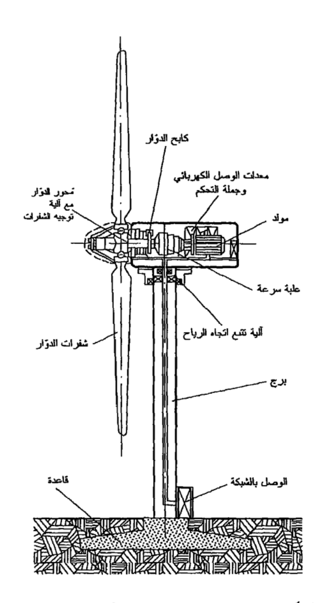
$$m = \rho_a A_1 w_1 = \rho_a A_2 w_2 \qquad (3.11)$$

حيث A_1، A_2 مساحة مقطع الجريان قبل العنفة الهوائية وبعدها

w_1، w_2 سرعة الرياح قبل العنفة الهوائية وبعدها.



الشكل 6.11 : أنواع محطات الرياح (a) الدوارة البطيئة، عنفات هوائية أميركية (b) الدوارة السريعة ذات شفرة أو الشفرتين أو الثلاث شفرات (c) دوارة سافونيوس* (d) دوارة ديروس (e) دوارة H ديروس.



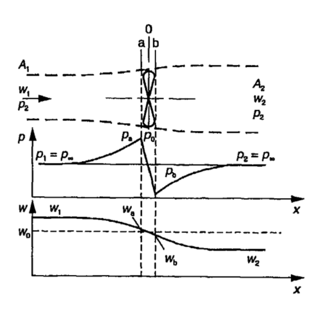
الشكل 7.11 : محطة رياح ذات محور أفقي.

يبين الشكل (8.11) تغيرات الضغط والسرعة عند الجريان عبر عنفة هوائية. من معادلة برنولي يمكن حساب مركبة القوة المؤثرة على الدّوار (rotor)، باتجاه حركة الجريان، وذلك بفرض أن الجريان يتم دون احتكاك وثابت الضغط ($p_1 = p_2$):

$$F_2 = \rho_a (w_1^2 - w_2^2)/2 \quad [N] \qquad (4.11)$$

حيث: A مساحة سطح الدوار [m^2].

* مهندس فنلندي ــــ المترجم



الشكل 8.11 : تغيرات الضغط والسرعة عند الجريان عبر عنفة هوائية.

وتنتج استطاعة العنفة الهوائية من الفرق بين استطاعة الريح قبل الدّوار وبعدها.

$$P_T = m\ (w_1^2 - w_2^2)/2 \quad [W] \tag{5.11}$$

وعملياً تحسب استطاعة العنفة الهوائية P_T كما يلي:

$$P_T = 0.5\ C_p\, A\, \rho_a\, w^3 \quad [W] \tag{6.11}$$

حيث: C_p قرينة الاستطاعة

w سرعة الريح [m/s].

قرينة الاستطاعة

من المعادلتين 5.11 و6.11 ينتج أن قرينة الاستطاعة C_p هي النسبة بين الاستطاعة في واحدة المساحة للدوار $p_T = P_T / A$ والاستطاعة في واحدة المساحة للريح، وهي تحسب كما يلي:

$$C_p = 0.5\,(1 + w_2 / w_1)\,(1 - w_2^2 / w_1^2) \tag{7.11}$$

يبين الشكل (9.11) قرينة الاستطاعة C_p لأنواع الدوارات المختلفة وعلاقتها برقم سرعة الدولاب $\lambda = u / w$ (حيث u السرعة المحيطية للدوار وw سرعة الريح). تبلغ القيمة الأعظمية النظرية لـ C_p 16/27 = 0.593. تصل قيمة C_p في دوار ذي شفرتين إلى حوالي 0.45.

عزم الدوران

عند سرعة دوران n (s^{-1}) للدوار فإن العزم المؤثر يبلغ:

(8.11) $$M = P_T / 2\pi n \quad [\mathrm{N\,m}]$$

يُحسَب عزم الدوران عند معرفة السرعة المحيطية وسرعة الدوران للدوار كما يلي:

(9.11) $$M = P_T / \omega = P_T R / u = 0.5\, C_P A \rho_a w^2 R / \lambda \quad [\mathrm{Nm}]$$

حيث: P_T استطاعة العنفة الهوائية [W]

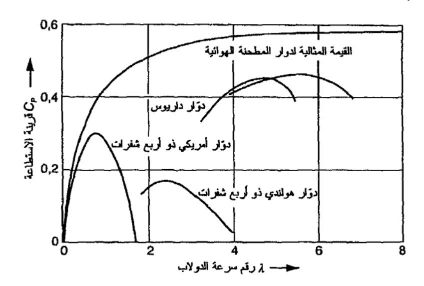
ω سرعة الدوران للدوار [s^{-1}]

R نصف القطر [m]

u السرعة المحيطية للدوار عند نصف القطر R [m/s]

w سرعة الريح [m/s]

λ رقم سرعة الدولاب (= u/v).



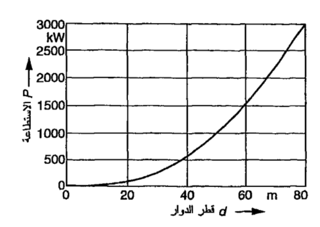
الشكل 9.11 : قرينة الاستطاعة C_P وعلاقتها برقم سرعة الدولاب λ للعنفة الهوائية (أنواع الدورات المختلفة).

التصميم

يبين الشكل (10.11) العلاقة بين قطر الدوار d واستطاعة العنفة الهوائية P. كما يبين الجدول (3.11) القيم التصميمية لمحطة ريحية باستطاعة 600 kW.

إذا كان تصميم المنشأة يتضمن ثلاث شفرات مع محور صلب شفرات مع محور صلب، وكانت الشفرة مصنوعة من البوليستر المُقسّى بخيوط زجاجية GFK، فيمكن الحصول على استطاعة مثلى

عند الحمولات الدنيا للمنشأة. ونبين فيما يلي مواصفات محطة الرياح: الاستطاعة الاسمية 600 kW عند $w = 14.5$ m/s، سرعة الوصل 4.5 m/s، سرعة الفصل 25 m/s، سرعة التحمل (سرعة الرياح التي تتحملها المنشأة دون أن تنهار) 57 m/s.



الشكل 10.11 : استطاعة العنفة الهوائية وعلاقتها بقطر الدوار d.

يتم الانطلاق عند تصميم محطة الرياح من حوالي 2500 ساعة استفادة في العام في مواقع تبلغ السرعة الوسطية للرياح فيها 6m/s.

الجدول 3.11: القيم التصميمية لمحطة الرياح AN BONUS 600 kW

الوصف	القيمة
1. قطر الدوار	41 m
عدد الشفرات	ثلاث مصنوعة من بوليستر مسلّح بخيوط زجاجية GFK، الطول 19 m
عدد الدورات	30 min^{-1}
تنظيم الاستطاعة	مستقر، مربط ذو زاوية معايرة ثابتة
2. المولد	ترامني (توافقي) (Synchronous)، 600 kW ، 50 Hz، 1500 min^{-1}
3. علبة السرعة	ثلاثية المراحل، نسبة التعشيق 1 :50
الوصل بين المولد والمحور	وصل مرن
4. التحكم	جملة ذات معالج صغير (microprocessor)
5. البرج	أنبوب فولاذي بارتفاع 40 m وارتفاع المحور 42.3 m

يتعرض توليد الطاقة في محطات الرياح لتغيرات كبيرة، وهذا يتطلب تنظيم سرعة الدوران والاستطاعة للمحطة. ثمة نوعان مستخدمان للتحكم: في النوع الأول تخفض سرعة الدوران بتقليل

الهواء المندفع نحو رؤوس الشفرات (التحكم المستقر). وفي النوع الثاني تخفض سرعة الدوران عن طريق تغير زاوية شفرات الدولاب الدوار (التحكم بالخطوة Pitch).

يبين الجدول (4.11) المواصفات الفنية لمحطة رياح استطاعتها الكهربائية 500 kW.

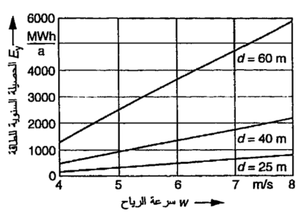
الجدول 4.11: مواصفات محطة ريحية باستطاعة 500 kW.

طبقة (نوع) العنفة الهوائية	500	1000	1500	2000
الاستطاعة الاسمية، kW	500	1000	1500	2000
السرعة الاسمية للريح، m/s	13	15-14	5	15
سرعة الرياح عند الوصل/والفصل، m/s	25/4	25/3	25/4	21/3
قطر الدوار، m	40-36	55-53	65-63	60
عدد الشفرات	3/2	3/2	3	2
عدد دورات الدوار، min^{-1}	30- 20	25-17	20-14	30
طريقة تقليل (التحكم) الاستطاعة	Pitch/stall	stall	Pitch/stall	stall
ارتفاع البرج/ والمحور m	50- 40	58	60	66

الحصيلة السنوية للطاقة

تتمدد الحصيلة السنوية للطاقة التي تنتجها محطة رياح (الإنتاج السنوي) عن طريق المقدرة على تقديم الاستطاعة النوعية، e_y، أي كمية الطاقة التي تُكسَب في العام من كل $1\ m^2$ من سطح الدوار. تتراوح e_y وفقاً للسرعة الوسطية للريح بين 250 و640 kWh لكل $1\ m^2$ من سطح الدوار خلال العام وذلك من أجل محطات الرياح الصغيرة والمتوسطة.

تبلـغ الحصيلة السنويـة للطاقـة لمحطة رياح باستطاعة $P_T = 175$ kW (قطر دوّارها 25 m) $E_y = 160$ MWh/a عند سرعة $w = 4$ m/s و680 MWh/a عند سرعة $w = 8$ m/s. وبسبب ارتفاع سرعة الرياح عند الارتفاع عن سطح الأرض فإن المقدرة على تقديم الاستطاعة النوعية تزداد في المحطات الكبيرة لتصبح $e_y = 1.5$MWh لكل $1\ m^2$ في عام. لهذا فإن محطة رياح قطر دوارها 80 m، واستطاعتها 3 MW تكون الحصيلة السنوية التي تنتجها $E_y = 2.7$ GWh/a عند $w = 4$ m/s وتكون قيمة $E_y = 11$ GWh/a عند $w = 8$ m/s. وعندما يكون القطر 100 m ($P_T = 5$ MW) يفترض أن تصل قيمة E_y إلى 4.5 GWh/a عند $w = 4$ m/s و19 GWh/a عند $w = 8$ m/s. إن الحصيلة السنوية لطاقة محطة رياح E_y تابع لسرعة الريح w وقطر الدوار d كما يبين ذلك الشكل (11.11).



الشكل 11.11 : الحصيلة السنوية لطاقة محطة رياح وعلاقتها بسرعة الريح *w* وقطر الدوار *d*.

في عام 1992 أنتجت 3440 عنفة مركبة في كافة أنحاء العالم بمجموع استطاعتها MW 46 كمية 800 GWh/a من الطاقة كهربائية.

تتراوح أكبر القيم للاستطاعات الإفرادية بين 500 و3200 kW. وقد اكتسبت العنفات الهوائية الدانماركية شهرة واسعة، وهي تورد إلى كافة أنحاء العالم، وتعمل في الدانمارك منذ عام 1988 مزرعة ريحية (Wind Farm) فيها عنفتان استطاعة كل منهما kW 630، وقطر الدوار m 40 بالإضافة إلى 5 عنفات استطاعتها kW 750. أكبر عنفة هوائية في العالم هي MOD-5 ذات الاستطاعة الكهربائية MW 3.2 وقطر الدوار m 98 وضعت في الخدمة في هاواي عام 1987 وهي قيد العمل حتى الآن، وهذه العنفة تمثل الجيل الثالث من محطات الرياح. من محطات الجيل الثاني هناك عنفة استطاعتها MW 2 وقطر دوراها m 61 في نورث كارولينا (USA) وأكبر محطات أوروبا (MW 2، قطر الدوار W 60) في Tjaereborg (الدانمارك). يصل ما تولّده محطة Taereborg من الكهرباء في العام إلى حوالي GWh/a 3.4.

التكاليف

تبلغ تكاليف محطة رياح باستطاعة kW 300 مبلغ DM 627 لكل 1 m^2 من سطح الدوار أو DM 1580 لكل kW 1 استطاعة، أما تكاليف التشغيل فتبلغ 0.006 إلى DM/kWh 0.008. وبحسب الموقع يتراوح توليد الكهرباء السنوي من 500 إلى MWh/a 600، وتكاليف التوليد DM/kWh 0.17. تبلغ المساحة اللازمة للدوار من أجل كل kW 1 استطاعة حوالي 2.5 m^2. كما تبلغ القيم الوسطية لـــ 8 مزارع ريحية في إقليم Elsom (الدانمارك) كما يلي: 240 جهازاً، الاستطاعـــة الإجمالية: MW 42.7، الاستطاعة الوسطية kW 178، التكاليف الاستثمارية:

DM/kW 2100، التوليد السنوي النوعي للكهرباء kWh/a 2005، تكاليف الطاقة المولدة 0.11 إلى DM/kWh 0.13. يعتبر النموذج الأمثل للعنفات في الدانمارك باستطاعة MW 1 وبقطر للدوار قدره 50 m. ومن المزمع إجراء تطويرات بحيث تصبح الاستطاعة الإجمالية MW 1.5 بحيث يصل الإنتاج السنوي للكهرباء GWh/a 3.5 عام 2000 في الدانمارك*. وسيمثل هذا 9.3 % من التوليد الإجمالي فيها.

مثال 2.11

يُطلبَ حساب قطر الدوار لمحطة رياح استطاعتها MW 250 في موقع تبلغ السرعة الوسطية للرياح فيه $w = 12$ m/s. قرينة الاستطاعة $C_P = 0.43$ وفترة الاستخدام السنوية $t_y = 2400$ h/a. كذلك يُطلبَ تحديد الاستطاعة على واحدة السطح P_T والحصيلة السنوية E_y وعزم الدوران M عند سرعة دوران للدوار تبلغ $50\ s^{-1}$. الكتلة النوعية للهواء $\rho_a = 1.205$ kg/m^3 عند درجة الحرارة 20 °C.

الحل

1. تُحسب الاستطاعة عند واحدة السطح كما يلي:

$$p_T = 0.5\, C_P\, \rho_a\, w^3$$
$$= 0.5 \times 0.43 \times 1.205\ \text{kJ/m}^3 \times (12\ \text{m/s})^3$$
$$= 447.68\ \text{W/m}^2$$

2. تحسب مساحة الدوار كما يلي:

$$A = P_T / p_T$$
$$= 250\ \text{kW} / 447.68\ \text{W/m}^2 = 558\ \text{m}^2$$

3. قطر الدوار:

$$D = \sqrt{4A/\pi} = \sqrt{4.558/\pi} = 26.7\,\text{m}$$

4. الحصيلة السنوية للطاقة:

$$E_y = P_T\, t_y = 250\ \text{MW} \times 2400\ \text{h/a}$$
$$= 600\ \text{MWh/a}$$

* التوقعات كانت في عام تأليف الكتاب 1997 ــــ المترجم

5. عزم الدوران:

$$M = P_T / 2\,\pi\, n = 250 \text{ kW} / 2\,\pi \times 50 \text{ s}^{-1} = 796 \text{ Nm}$$

3.11 طاقة باطن الأرض الحرارية (الجيوحرارية)*

تسود في مركز الأرض جرّاء تفكك النظائر درجة حرارة تصل إلى 10000 °C، وهكذا ينشأ تيار دائم من الطاقة يبلغ 4.2×10^{10} kW كثافته الوسطية 0.063 W/m^2. ويتطلب استثمار حرارة الأرض لتوليد الطاقة أماكن ذات تدرج (gradient) عالٍ غير عادي لدرجة الحرارة يبلغ 0.3 K لكل 1 m من العمق.

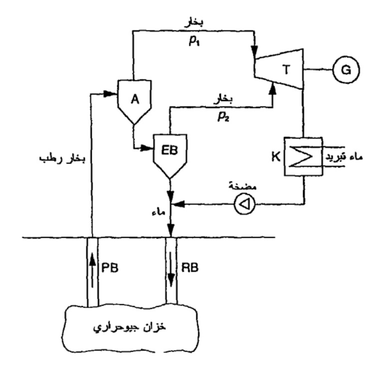
تعمل في العالم محطات كهربائية تستفيد من طاقة باطن الأرض (جيوحرارية) باستطاعة إجمالية 5000 MW، ففي الولايات المتحدة 1350 MW والفلبين 784 MW وإيطاليا 455 MW، وفي كلٍّ من اليابان والمكسيك ونيوزيلندا حوالي 205 إلى 218 MW. أما أكبر المنشآت فهي The Geysers في الولايات المتحدة (674 MW) وLaderello في إيطاليا (420 MW) تبلغ تكاليف التوليد من الطاقة الجيوحرارية 0.04 DM/kWh (أسعار عام 1985)، كذلك تستخدم حرارة الأرض إضافة إلى توليد الكهرباء في تأمين التدفئة. فمثلاً تؤمن التدفئة في Rejkjavic (عاصمة ايسلندا) من حرارة الأرض.

تستخدم لتوليد الكهرباء دورة البخار.

ويبين الشكل (12.11) مبدأ العمل وبنية المحطة الجيوحرارية. يستخرج البخار المسخن من خزان جيوحراري عن طريق ثقوب (فتحات). يندفع من الثقوب خليط من الماء والبخار مع مواد معدنية منحلة (NaCl، KCl... إلخ) وغازات غير قابلة للتكاثف (CO_2 وH_2S). يُحرَّر البخار من الماء عن طريق فاصل يعمل بالطرد المركزي (Separator). ويستخدم لمكافحة الضجيج كاتم خاص. يسترجع الماء من الفاصل مع ماء العنفة والمكثف وتعاد هذه المياه لتحقن ثانية في الفتحات إلى الخزان الجيوحراري. عن طريق تمدّد البخار المشبع الذي تبلغ درجة حرارته 200 °C وضغطه حتى 15 bar في عنفة بخارية يتم كسب عمل وتوليد الكهرباء بواسطة المولدة الكهربائية.

---

* Geothermal Energy ـــ المترجم.



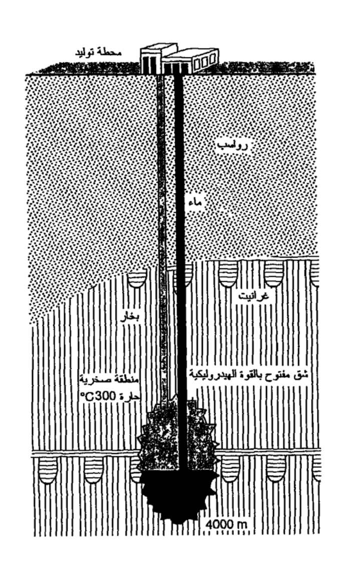
A: ساحب للماء
EB: خزان تمدد
T: عنفة بخارية
C: مكثف
PB: فتحة إنتاج
RB: فتحة إعادة الحقن

الشكل 12.11 : مبدأ العمل والتركيب الأساسي لمحطة توليد كهرباء جيوحرارية.

للاستفادة من حرارة الأرض عن طريق صخور جافة ساخنة تستخدم طريقة (Hot dry rock) HDR، والشكل (13.11) يمثل هذه الطريقة بشكل تخطيطي. عن طريق فتحة إعادة حقن يُضغَط الماء البارد خلال شق موجود في صخور مسامية على عمق عدة كيلومترات، وبهذا تزداد قابلية الصخور للتمرير وبواسطة فتحة إنتاج يُساق الماء المسخن بواسطة حرارة الأرض إلى محطة الطاقة. يعتبر استخدام هذه التقانة عند استطاعة حرارية قدرها 100 MW اقتصادياً. الجدول (5.11) يتضمن مواصفات أكبر ثلاث محطات طاقة جيوحرارية.

الجدول 5.11: معطيات أكبر ثلاث محطات طاقة جيوحرارية

المحطة	الاستطاعة [MW]	درجة حرارة البخار [°C]	العمق [m]
Lardarello (إيطاليا)	400	200	600
Wairakei (نيوزيلاندا)	200	230	800
The Geysers (الولايات المتحدة)	600	250	1500



الشكل 13.11 : طريقة الصخور الجافة الساخنة (Hot-dry-rock).

4.11 طاقة الأمواج والمدّ والجزر

طاقة الموج وجريان ماء البحر

تنشأ أمواج البحر بفعل الرياح، وتمتلك هذه الأمواج طاقة كامنة وحركية. يبلغ إجمالي تدفق الطاقة بسبب جريان الهواء والبحار حوالي 2.10^{12} kW . إن الأماكن ذات الرياح العالية السرعة والشواطئ الحرة المقابلة لبحر مفتوح مناسبة لاستخدام طاقة الأمواج. وعند ارتفاع m 1.5 فإن الموجة تكتسب خلال 6 أو 7 ثواني استطاعة مساوية لـ kW 14 لكل m من طول الشاطئ، فإذا اعتبرنا طول الشاطئ بالكامل فيمكن أن تكون الاستطاعة عالية إلى حدّ ما. إلاّ أنه لا توجد حتى الآن آلات عملية تقوم بهذا. وتستخدم فـي فرضية ممكنة من هذا النوع زعانف موصولة بطـول

m 10 وعرض 20 إلى m 40 [1.11]، ويبدو أن من الممكن تصنيع منشأة باستطاعة MW 1 بهذه الطريقة رغم طبيعة العمل المتقطعة والتأرجح الكبير في هذه الطاقة، بالإضافة إلى العوائق المتعددة التي تقف في وجه تطبيق المشاريع المختلفة ذات محاور الكامات الطافية والطوافات الحلقية والطوافات على شكل سفينة ...إلخ [1.11]. إن الحصول على طاقة من جريان ماء البحر، مثل تيار الخليج أو تيار Kuroshio، مرتبط بمشاكل فنية أكثر من الحصول على طاقة الأمواج. وبحسب مشروع موجود في أمريكا (USA) فإنه يتم تحويل طاقة الحركة لتيار الخليج في صفٍّ من العنفات المائية تتوضع دون مستوى الماء قطرها m 150. إذا اعتبرنا سرعة الماء m/s 2.5 فستكون استطاعة العنفات MW 75، أي أنه من أجل الحصول على استطاعة قدرها MW 1200 فستلزم 15 عنفة من هذا النوع.

طاقة المد والجزر Tidal Power

تنشأ هذه الطريقة جرّاء الجاذبية المتبادلة بين الأرض والقمر والشمس، وهناك أماكن معينة فقط في العالم مناسبة لاستخدام طاقة المدّ والجزر. والفكرة هي استخدام التغير الشديد لوضع الماء في بعض المناطق من الشاطئ التي يصل فيها ارتفاع المد إلى عشرة أمتار أو أكثر، وتقدر الاستطاعة العالمية الكامنة وفق هذه الطريقة بـــ GW 40 (استطاعة كهربائية). أما عيب محطات توليد الطاقة عن طريق المد والجزر فهو تقلب العمل (Periodical operation).

وهناك حالياً على مستوى العالم محطتا توليد للكهرباء باستخدام طاقة المد والجزر.

- محطة في ST .Malo (فرنسا) ذات استطاعة كهربائية قدرها MW 240 (24 عنفة كل منها استطاعتها MW 10)، يقوم سد التخزين التابع لها بجمع 200 مليون متر مكعب في حوض تخزين، وارتفاع المد يصل إلى 12 أو m 13 والطاقة المولدة سنوياً GWh 500 (قارن هذه القيمة مع GWh 2100 التي تولدها محطة توليد الطاقة المائية العادية).
- المحطة التجريبية ذات الاستطاعة الكهربائية kW 800 في Kisbgubsk (روسيا).

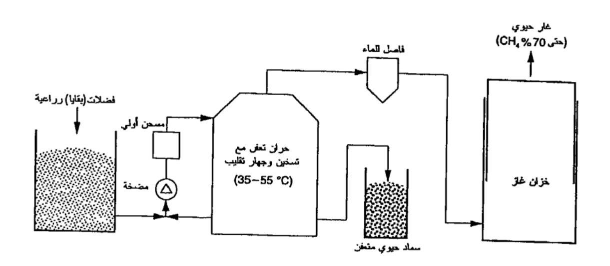
وهناك خطط لبناء منشآت ذات استطاعة إجمالية قدرها GW 3 في بريطانيا و GW 6 في كندا.

5.11 استخدام طاقة الكتلة الحيوية

تنشأ الكتلة الحيوية عن طريق التمثيل الضوئي الذي يحول تدفقاً من الطاقة قدره 1×10^{11} kW إلى مواد نباتية حية. يبلغ المخزون العالمي من الكتلة الحيوية على اليابسة فقط حوالي 2000 مليار

طن، وهذا يعادل مخزوناً من الطاقة قيمته 3×10^{22} J. يبلغ مكافئ الطاقة لنمو الكتلة الحيوية في العام 3×10^{21} J، وهذا يوافق مردود استخدام للطاقة الشمسية قيمته 0.5 % للغابات وللماء الحلو. يستخدم حالياً فقط 1 % من الكتلة الحيوية في العالم لأغراض الطاقة. يمكن زراعة الأشجار سريعة النمو أو قصب السكر لقصب السكر أو الزيت بغرض استخدام طاقة الكتلة الحيوية. لقصب السكر والشوندر السكري مردود استخدام للطاقة الشمسية قيمته 5 %. إن القدرة الاقتصادية لإنتاج الكتلة الحيوية ضئيلة. أما تركيب الكتلة الحيوية فهو وسطياً كالتالي: 65 % سيلولوز، 17 % هيميسيلولوز (نصف سيلولوز)، 17 % خشب، 2 إلى 6 % مواد معدنية أو مواد أخرى. وهناك شكل آخر للكتلة الحيوية هو المخلفات (الفضلات) النباتية والحيوانية. يمكن في ألمانيا وحدها إنتاج طاقة سنوية تكافئ طاقة 10 مليون طن من الفحم الحجري عن طريق فضلات الكتلة الحيوية وهذا يكافئ 3 % من استهلاك الطاقة الأولية.

لتحويل الكتلة الحيوية يمكن استخدام الطرق البيولوجية ــ الكيمائية الحيوية والطرق الفيزيائية ــ الترموديناميكية. يتم في المرحلة الأولى تحويل الكتل الحيوية إلى حوامل للطاقة عند درجات حرارة منخفضة بواسطة كائنات حية صغيرة (مجهرية). يستخدم لأغراض هندسية الغاز الحيوي وغاز الإيتان الناتجان عن ميكروبات التفكيك أو تغيير التركيب (عن طريق الخمائر أو الأنزيمات) للكتلة الحيوية الحاوية على الفحوم الهيدروجينية عند نقص الهواء (لا هوائية) في وسط مائي. في بكتيريات النسيج الأوسط للنبات تبلغ فترة التخمر 20 إلى 30 يوماً، تكون درجة حرارة العملية 20 حتى 40 °C، أما بكتيرات الوسط الدافئ فتبلغ فترة تخمرها 3 إلى 10 أيام عند درجة حرارة 45 إلى 60 °C. ويبين الشكل (14.11) تخطيطياً منشأة حيوية تعمل بشكل متواصل. تتراوح كمية الغاز الحيوي الذي يتم كسبه بين 0.3 ــ 0.4 و0.4 ــ 0.7 m^3 لكل kg كتلة جافة من الفضلات الحيوانية والزراعية. ولإنتاج الغاز الحيوي يمكن استخدام الفضلات النباتية والروث والوحل الناتج عن معالجة مياه المجاري الصناعية أو البلدية (للمدينة) والقمامة والبقايا النباتية للمنتجات الغذائية. يبلغ محتوى الغاز الطبيعي من CH_4 60 إلى 70 %، أما قيمته الحرارية الدنيا فهي 20 حتى 30 MJ/m^3. من مركبات الغاز الحيوي هناك CO_2 (حتى 35 %) بالإضافة إلى كلٍّ من H_2 وN_2 بنسبة 0.2 لكلٍّ منها و0.1 % H_2S. وبناءً على مجال الاستخدام فإن الغاز الحيوي الخام يجفف ويُخلّص من الكبريت، وعندئذٍ يمكن استخدامه في محطات التدفئة وتوليد الكهرباء.



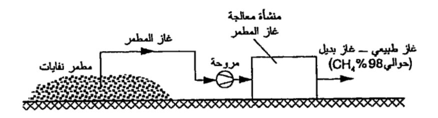
الشكل 14.11 : مخطط منشأة حيوية.

تُحرَق الكتلة الحيوية (الخشب، فضلات الخشب، القمامة، الفضلات) إما مباشرةً أو تحول أولاً إلى منتجات ثانوية (غاز حيوي، غاز مطامر الفضلات أو منشآت معالجة المجاري، الكحول، غاز أو زيت التحلل الحراري).

تُحوَّل الكتلة الحيوية بطرق فيزيائية ــ كيميائية حرارية إلى طاقة أو حاملٍ للطاقة ــ وأكثر الطرق انتشاراً هي التحضير الميكانيكي للكتلة الحيوية، مثل إعطاء بقايا الخشب والقش شكل كرات صغيرة أو قوالب أو مثل استخلاص الزيوت النباتية أو الهيدروكربونات، كذلك إحراق الخشب والفضلات لتوليد الكهرباء والحرارة وتحويل الخشب والفضلات إلى غاز وتحويل الكتلة الحيوية إلى سائل (تمييعها).

يصل المردود عند توليد الكهرباء إلى حوالي 20 %، وعند توليد الحرارة إلى 70 %. يمكن تحويل الكتلة الحيوية إلى غاز بمردود تحويل يصل إلى 70 ــ 80 %، وذلك باستخدام الهواء لإنتاج غاز المولدات الذي قيمته الحرارية الدنيا حوالي 5 MJ/m^3، وعند استخدام البخار والأوكسجين ينتج غاز صناعي (مزيج من أول أوكسيد الكربون والهيدروجين). يُولَّد من الكتلة الحيوية وقود سائل أو صلب أو غازي عن طريق التحلل الحراري أو التقطير التفكيكي أو بواسطة سحب الغاز في جو خال من الهواء ودرجة الحرارة من 300 حتى 1000 °C.

ينتج سنوياً 500 kg من القمامة لكل فرد وينشأ من 1000 kg قمامة منــزلية حوالي 8 m^3/a غاز مطامر، الذي يمكن استخدامه للتدفئة ولتوليد الكهرباء.



الشكل 15.11 : مخطط منشأة غاز المطمر.

يحوي الغاز الناتج عن مطمر فضلات حوالي 59 % ميتان CH_4 وحوالي 40 % ثاني أوكسيد الكربون CO_2، وحوالي 1 % آزوت (نتروجين) N_2 وآثاراً من الفحوم الهيدروجينية الثقيلة C_mH_n وكبريت الهيدروجين H_2S (ضار)، وروابط كبريت عضوية و فحوم هيدروجينية هالوجينية، وهذا الغاز الناتج عن المطامر غاز ضعيف له قيمة حرارية دنيا تبلغ 5 MJ/m^3. عند وجود كميات كبيرة في المطامر يمكن معالجة غاز المطمر وتحويله إلى غاز طبيعي ـــ غاز بديل. ويمكن إغناء الغاز بامتصاص ثاني أوكسيد الكربون منه أو بإضافة الميتان له (حوالي 98 %). تقدم أكبر منشأة في العالم لتوليد غاز المطمر (توجد في Freshkills قرب نيويورك) حوالي 52×10^6 m^3/a من الغاز الطبيعي ـــ الغاز البديل وتحقن هذه الكميات بشبكة الغاز الطبيعي العامة. يبين الشكل (15.11) بشكل تخطيطي منشأة لغازات المطامر.

12 تخزين الطاقة

1.12 طرائق تخزين الطاقة ومعايير تقويمها

طرائق تخزين الطاقة

يرفع تخزين الطاقة الجاهزية وإمكانية استخدام هذه الطاقة، ووفقاً لشكل الطاقة يُميَّز بين:

- خزانات الطاقة الميكانيكية (الدولاب المعدل أو الحدافة، أحواض التخزين بالضخ، خزانات الهواء المضغوط)،
- خزانات الطاقة الحرارية،
- البطاريات الكهربائية، المدخرات (المركمات) وخزانات الحقل المغناطيسي.

معايير التقويم

تتميز خزانات الطاقة بالمعايير التالية:

- المحتوى الحراري أو سعة التخزين،
- الكثافة النوعية لطاقة الخزان،
- استطاعة التعبئة/ الشحن والتفريغ،
- فترة تخزين الطاقة،
- درجة الاستخدام (الاستفادة)،
- التكاليف الاستثمارية والعمر وفترة استرجاع التكاليف الاستثمارية (amortization).

سعة التخزين وكثافة الطاقة

يُعرَّف محتوى الطاقة أو سعة التخزين بأنه كمية الطاقة الأعظمية التي يمكن جمعها في خزان طاقة ذي نوع وحجم معين خلال دورة العمل.

أما الكثافة النوعية للطاقة لخزان طاقة ما فهي محتوى الطاقة بالنسبة لكل kg أو m^3، ويعطي الجدول (1.12) الكثافة النوعية للطاقة لمختلف أنواع خزانات الطاقة.

الجدول 1.12: الكثافة النوعية للطاقة في خزانات الطاقة.

خزان الطاقة	كثافة الطاقة [Wh/kg]
	خزانات الحرارة المحسوسة ($\Delta t = 50K$)
ماء	58
البيتون، الصخر، الحصى	13
الحديد	8
تربة (حصيات خشنة)	25
	خزانات الحرارة غير المحسوسة (latent) (حرارة لانشعر بها)
الثلج (درجة ذوبانه 0 °C)	93
البارافينات(درجة ذوبانها 42 − 67 °C)	47—52
هيدرات الأملاح اللاعضوية (درجة الذوبان 29 — 70°C)	48—70
فلوريد الليتيوم LiF (درجة الذوبان 848°C)	283
	خزانات الطاقة الميكانيكية
حوض التخزين بالضخ، الارتفاع 300 m	0.81
الدولاب المعدل (الحدافة)	30 - 20
	الوقود الاصطناعي/ الهيدروجين
الهيدروجين السائل	33000
الهيدروجين، هيدرات المعادن	600—2500
الميتانول	7390
الإيتانول	7695
	البطاريات (المركمات)
الرصاص ــ حموض الكبريت (20 - 30°C)	40
النيكل ــ الحديد	60
النيكل ــ الكادميوم	100
Na-S و 4-S (300 - 375 °C)	150

استطاعة التعبئة / الشحن والتفريغ

تُعرف كمية الطاقة التي تقدم إلى خزان الطاقة أو تُستجر منه في واحدة الزمن بأنها استطاعة التعبئة / الشحن أو التفريغ حسب الحال، وهي مقدار تابع للزمن، وتكون استطاعة التعبئة / الشحن والتفريغ في بداية أي عملية أكبر منها في نهايتها.

خزانات الطاقة القصيرة أو الطويلة الأمد

يُميَّز وفقاً لفترة التعبئة / التخزين بين الخزانات القصيرة أو الطويلة الأمد، وتتألف دورة عمل خزان ما من:

- الشحن بنقل الطاقة من منبع للطاقة
- التخزين (مرحلة الركود) بدون إضافة أو طرح للطاقة
- التفريغ نتيجة استجرار الطاقة ووضعها بتصرف المستهلك.

تتألـــف دورة العمل τ_c من زمن الشحن t_{ch} وزمن التخزين (الركود) $\tau_{storage}$ وزمن التفريغ $\tau_{d\,ch}$.

درجة الاستخدام (الاستفادة)

درجة استخدام خزان طاقة η_S هي نسبة كمية الطاقة المستجرة E_R إلى كمية الطاقة المقدمة E_S بالنسبة إلى دورة العمل:

$$\eta_s = E_R / E_S = 1 - E_{los} / E_s \qquad (1.12)$$

حيث: E_{los} ضياعات الطاقة.

2.12 خزانات الطاقة الميكانيكية والكهربائية

1.2.12 التخزين بالحدّافة (Fly Wheel)، أحواض التخزين بالضخ، التخزين بالهواء المضغوط

يمكن تخزين الطاقة الميكانيكية باستخدام الحدافة أو أحواض التخزين بالضخ أو بالهواء المضغوط.

التخزين باستخدام الحدّافة Fly Wheel

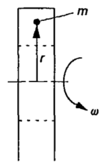
تخزن في الحدافة الطاقة الحركية، وتأخذ الحدّافات أشكالاً مختلفة: قرصاً دائرياً أو حلقة دائرية أو قضيباً طويلاً رقيقاً. يبين الشكل (1.12) حدّافةً بشكل تخطيطي. يُحسب محتوى الطاقة كما يلي:

(2.12)	$E = {}^1/_2\, M\omega^2$ [J]

حيث: E محتوى الطاقة

M عزم عطالة الكتلة [kgm^2]

ω السرعة الزاوية [s^{-1}].



الشكل 1.12 : خزان يستخدم حدّافة على شكل حلقة دائرية.

أما عزم عطالة الحدافة الأسطوانية الشكل فيحسب كما يلي:

$$M = {}^1/_2\, m\, r^2 \quad (3.12)$$

حيث: m الكتلة [kg]

r نصف القطر [m].

عند التحميل الكامل تصل الحدافة إلى سرعتها الزاوية الأعظمية ω_{max} ويصبح محتواها من الطاقة أعظمياً:

$$E_{max} = {}^1/_2\, M\omega^2_{max} \; [J] \quad (4.12)$$

أما الطاقة المستجرة من الحدافة التي تلعب دور خزان طاقة فهي:

$$E_{max} = {}^1/_2 M(\omega^2_{max} - \omega^2_{min}) \; [J] \quad (5.12)$$

حيث: ω_{min} السرعة الزاوية الأصغرية [s^{-1}].

تحسب كثافة الطاقة بالنسبة لـ kg 1 كتلة كما يلي:

$$e = E/m = \tfrac{1}{4}\, r^2 (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2)$$
$$= k(\sigma/\rho) \quad [J/kg] \qquad (6.12)$$

حيث: k عامل الشكل (من 0 حتى 1)

σ إجهاد شد المادة المسموح به [N/m²]

ρ الكتلة النوعية للمادة [kg/m³].

تتحدد قيم e الممكن الوصول إليها بالشكل الهندسي للحدافة وبالمادة المصنوعة منها. الشكل الأمثل ذو $k = 1$ هو القرص ذو المقطع الأسي والمقاومة المتجانسة. من بين جميع خلائط المعادن فإن الأقراص المصنوعة من التيتانيوم تتمتع بكثافة طاقة أعظمية تبلغ 220 kJ/kg. للحصول على قيم أعلى، فإنه ينبغي استخدام مواد وصل. فمثلاً تبلغ قيمة e للدولاب المعدل الذي يأخذ شكل حلقة دائرية مصنوعة من الزجاج/الراتنج (Epoxy) 450 kJ/kg وللغرافيت/ راتنج تبلغ e 450 kJ/kg.

يبين الشكل (a2.12) محطة تخزين بالضخ، وهي تتألف من حوضي تخزين (علوي وسفلي) وأنابيب ضغط ومضخة/عنفة مع محرك/مولد. تحسب الاستطاعة اللازمة لضخ الماء من الحوض السفلي عبر أنابيب الضغط إلى الحوض العلوي كما يلي:

$$P_P = g\,\rho\, V H / \eta_P \qquad (7.12)$$

حيث: g التسارع الأرضي [m²/s]

ρ الكتلة النوعية للماء [kg/m³]

V التدفق الحجمي للماء [m³/s]

H فرق الارتفاع [m]

η_P المردود الإجمالي للمضخة مع محرك تشغيلها.

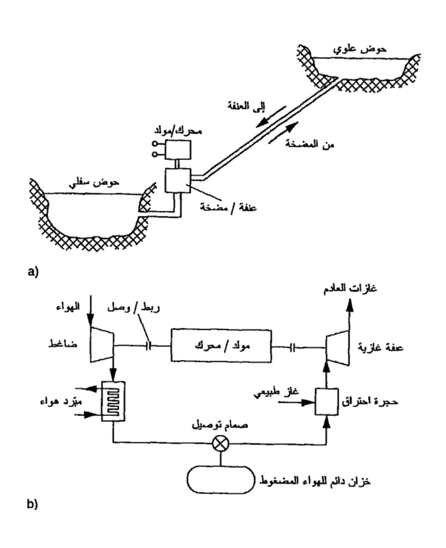
تُحسب الاستطاعة الميكانيكية التي يمكن كسبها بواسطة العنفة المائية كما يلي:

$$P_T = g\,\rho\, V H\, \eta_T \quad [W] \qquad (8.12)$$

حيث: η_T المردود الإجمالي للعنفة.

تكون الاستطاعة الكهربائية P_{el} أصغر من P_T بمقدار الضياعات في المولد.

أما درجة الاستفادة من محطة التخزين بالضخ فتنتج كنسبة بين الاستطاعة الكهربائية المستفاد منها والطاقة المستهلكة لذلك.



الشكل 2.12 : خزان للطاقة الكامنة (a) ذو أحواض تخزين بالضخ (b) ذو هواء مضغوط.

يمكن تخزين الطاقة الميكانيكية عن طريق ضغط مائع قابل للانضغاط مثل الهواء، والشكل (b2.12) يبين بشكل تخطيطي محطة تخزين بالهواء المضغوط. يخزن الهواء بعد ضغطه في خزان تحت الأرض، ثم يرسل الهواء ذو الضغط العالي إلى عنفة غازية ليقدم عملاً ويتمدد إلى ضغط الوسيط المحيط. لتخزين كميات كبيرة من الطاقة يلزم حجم كبير. توجد في العالم الآن جملتا تخزين بالهواء المضغوط إحداهما في ألمانيا والأخرى في الولايات المتحدة. الجملة الموجودة في ألمانيا (Hundorf) تتألف من محطة توليد كهرباء ذات عنفة غازية بالإضافة إلى تجاويف تحت الأرض حجمها المفيد $300000\ m^3$ عند عمق 650 إلى 800 m. يتم شحن الخزان بالهواء المضغوط (ضغطه 72 bar) في أوقات الحمولة الضعيفة (الاستطاعة 60 MW، تدفق الهواء الكتلي 108 kg/s)، وفي الحمولة القصوى يُولّد تيار بواسطة محطة التوليد ذات العنفة الغازية (استطاعة المولد 290 MW). وهكذا

يساق الهواء المضغوط (بتدفق 425 kg/s) من المخزّن إلى حجرة الاحتراق ويحرق مع الغاز الطبيعي. تبلغ كثافة الطاقة لمخزن الطاقة 4 kWh/m^3، ويتم الحصول على مردود توليد للكهرباء قدره 42 % وكثافة الاستطاعة 1 kW/m^3. يسمح حجم التخزين بالتشغيل عند الحمولة الكاملة لمدة أربع ساعات.

وتعمل في الولايات المتحدة الأمريكية حالياً محطة تخزين بالهواء المضغوط استطاعتها 100 MW ذات خزان ضغطه متدرج موجود في تجاويف ملحية.

تُحسب الاستطاعة التي يمكن كسبها بواسطة العنفة الغازية (قارن الفصل السابع) كما يلي:

$$P_T = m_T \, \Delta \, h_T \, \eta_T \quad [W] \tag{9.12}$$

حيث: m_T التدفق الكتلي لغازات الاحتراق في العنفة الغازية [kg/s]

Δh_T هبوط الإنتالبي في العنفة عند ثبات الإيزنتروبي [kJ/kg]

η_T المردود الداخلي للعنفة.

الاستطاعة المستهلكة لضغط الهواء:

$$P_{comp} = m_{comp} \Delta h_{comp} / \eta_{comp} \tag{10.12}$$

حيث: m_{comp} التدفق الكتلي للهواء في الضاغط [kg/s]

Δh_{comp} تغير الإنتالبي في الضاغط عند ثبات الانتروبي [kJ/kg]

η_{comp} المردود الداخلي للضاغط.

يُحسَب هبوط الإنتالبي كما يلي:

$$\Delta h = c_p \, \Delta \, T \quad [kJ/kg] \tag{11.12}$$

حيث: c_p السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط

ΔT تغير درجة الحرارة في العنفة الغازية أو الضاغط [K].

تعطي النسبة بين P_T وP_{comp} المردود الآني (اللحظي) η لمخزن الهواء المضغوط.

2.2.12 تخزين الطاقة الكهركيميائي

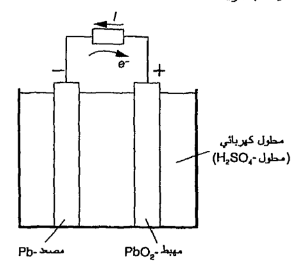
مبدأ تخزين الطاقة الكهربائي الكيميائي معلوم. تستخدم لتخزين الطاقة الكهربائية مدخرات/بطاريات الرصاص مصنوعة من الرصاص Pb أو Ni-Cd (مركّمات) أو غير ذلك، ولتخزين كميات كبيرة من الطاقة تلزم بطاريات تحقق المتطلبات التالية كحدٍّ أدنـــى: الاستطاعة النوعية

W/kg 50، كثافة الطاقة 200 Wh/kg، 1000 دورة كاملة، 4 إلى 6 سنوات كعمرٍ للعمل. يبين الشكل (3.12) مبدأ البطارية التي تعمل بالرصاص وحمض الكبريت.

يحسب التوتر (الجهد) U عند المقاومة الخارجية (الحمولة R_a) كما يلي:

$$U = E - I R_i \quad [V] \tag{12.12}$$

حيث: R_i المقاومة الداخلية للبطارية.



الشكل 3.12 : مخطط بطارية رصاص ـــ حموض.

أما التيار الممكن الحصول عليه فيبلغ:

$$I = E / (R_i + R_a) \quad [A] \tag{13.12}$$

كما يحسب هذا التيار كما يلي:

$$I = n F \quad [A] \tag{14.12}$$

حيث: n عدد مولات الالكترونات لكل مول من حمض الكبريت (يساوي 2)

F ثابت فاراداي 96487 C/Mol.

فالاستطاعة الممكن تقديمها تصبح:

$$P = U I \quad [W] \tag{15.12}$$

المثال المعروض أدناه يوضح حساباً لبطارية رصاص ـــ حمض الكبريت (مدخرة رصاصية).

مثال 1.12

مدخرة (بطارية) رصاصية 12-V تقدم تياراً شدته 60 A.

يُطلبَ حساب الاستطاعة الآنية المقدمة واستهلاك حمض الكبريت عند المصعد (anode).

الحل

تُحسَب الاستطاعة الآنية المقدمة كما يلي: $P = U\ I = 12V \times 60A = 720\ W$

يُحلّ في كل مول من حمض الكبريت H_2SO_4 مقدار 2 مول الكترونات من مهبط (Cathode) البطارية وينشأ هيدروجين جزيئي.

يُحسب استهلاك حمض الكبريت (بالمول) بالتفكك عند المصعد والمهبط للبطارية كما يلي:

$$N_{acid} = 2\ I / (n\ F)$$

حيث: F ثابت فاراداي وتبلغ قيمته 96487 C/Mol

n 2Mol الكترونات / Mol حمض كبريت

$N_{acid} = 2 \times 60A / (2 \times 96487\ As/Mol) = 6 \times 34\ 10^{-4} Mol/s$.

ويصبح بالتالي التدفق الكتلي لحمض الكبريت:

$$m = N_{acid}\ M_{H_2SO_4}$$
$$= 6.34 \times 10^{-4}\ Mol/s \times 98\ g/Mol = 0.06\ g/s = 0.22\ kg/h$$

3.12 تخزين الطاقة الحرارية

أنواع خزانات الطاقة الحرارية

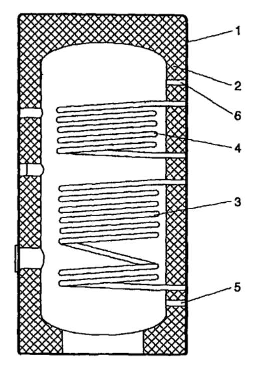
ثمة ثلاثة أنواع من التخزين هي التخزين على شكل حرارة محسوسة، والتخزين على شكل حرارة كامنة، والتخزين الحراري الكيميائي. تقسم الخزانات الحرارية بحسب درجة الحرارة إلى خزانات ذات درجة حرارة منخفضة (درجة الحرارة أدنى من 100 °C) وخزانات ذات درجة حرارة متوسطة (من 100 إلى 500 °C)، وخزانات ذات درجة حرارة عالية (فوق 500 °C).

لتخزين الحرارة المحسوسة تستخدم وسائط صلبة وسائلة. يتغير المحتوى الحراري لخزان حرارة محسوسة بتغير درجة حرارة وسيط التخزين. بواسطة انتالبي الانصهار العالي فإنه يمكن الحصول على كثافة طاقة عالية في خزانات الحرارة الكامنة. أما في خزانات الحرارة الكيميائية فتستخدم حرارة التفاعل في التفاعلات الكيميائية العكوسة وتكون كثافة الطاقة أعلى من سابقتها.

خزانات الطاقة الحرارية بالماء الساخن

يجب أن يكون لوسيط التخزين في خزانات الحرارة المحسوسة سعة حرارية عالية، ويستخدم الماء من أجل درجات الحرارة التي تقلّ عن 100 °C، حيث تبلغ سعته الحرارية النوعية 4.187 kJ/kgK.

يبين الشكل (4.12) بشكل تخطيطي خزان ماء ساخن. أما من أجل درجات الحرارة التي تزيد عن 100 °C فتلزم الخزانات المضغوطة، وتستخدم عندئذ وسائط سائلة أخرى مثل بخار الماء والسوائل العضوية والأملاح والمعادن المصهورة. أما الوسائط الصلبة فتكون من الخرسانة أو التراب أو المواد السيراميكية. يتضمـــن الجدول (2.12) القيم المميزة لوسائط التخزين عند درجات الحرارة المنخفضة.



الشكل 4.12 : خزانات الماء الدافئ القصيرة الأمد.

تُحسب سعة التخزين لخزان حرارة محسوسة كما يلي:

$$Q_s = m\,c\,(t_{max} - t_{min}) = V\,\rho\,c\,(t_{max} - t_{min}) \quad [J] \tag{16.12}$$

حيث: m كتلة وسيط التخزين [kg]

c السعة الحرارية النوعية لوسيط التخزين [J/kgK]

V الحجم [m³]

ρ الكتلة النوعية لوسيط التخزين [kg/m³]

t_{max} و t_{min} درجتا الحرارة الأعظمية والأصغرية للخزان [°C].

الجدول 2.12: القيم المميزة لوسائط التخزين في خزانات الحرارة المحسوسة عند درجات منخفضة.

وسيط التخزين	الكتلة النوعية ρ [kg/m³]	عامل التوصيل λ [W/mK]	السعة الحرارية النوعية c [J/kgK]
ماء	1000	0.68	4187
خرسانة (بيتون)	2400	2.1	1000
صخور — حصى	2750	2.9	890
تربة	2040	0.59	1840

أما الكثافة الحرارية المنسوبة إلى كتلة أو حجم الخزان فهي:

$$q = Q / m = c\,(t_{max} - t_{min}) \quad [J/kg] \qquad (17.12)$$

$$q_v = Q\ / V = \rho\ c'\,(t_{max} - t_{min}) \quad [J/m^3] \qquad (18.12)$$

واستطاعتا التعبئة / الشحن والتفريغ للخزان الحراري تحسبان كما يلي:

$$Q_{ch} = m\ c_p\,(t_{ent} - t_{exit}) \quad [W] \qquad (19.12)$$

$$Q_{d.ch} = m\ c_p\,(e_{xit} - t_{ent}) \quad [W] \qquad (20.12)$$

حيث: m التدفق الكتلي للناقل الحراري [kg/s]

c_p السعة الحرارية النوعية للناقل الحراري [J/kgK]

t_{ent}، t_{exit} درجة حرارة الدخول والخروج [°C].

مثال 2.12

ما هي كمية الماء اللازم لتخزين 300 kWh حرارة عندما تتغير درجة الحرارة في الخزان بين 80 °C عند الشحن الكامل و20 °C عند التفريغ؟ ما هي كثافة الطاقة المنسوبة إلى الكتلة أو الحجم لهذا الخزان؟

الحل

1. الحرارة النوعية للماء عند درجة الحرارة الوسطية 50°C = 2/(20 + 80) هي $c_p = 4181$ J/kgK والكتلة النوعية عند درجة الحرارة الوسطية هي $\rho = 988$ kg/m³.
2. كمية الماء اللازمة (الكتلة والحجم):

$$m = Q / c_p (t_{max} - t_{min})$$
$$= 300 \text{ kWh} \times 3600 \text{ s/h} / 4.181 \text{ kJ/kgK} (80 - 20) \text{ K} = 4305.2 \text{ kg}$$
$$V = m / \rho$$
$$= 4305.2 \text{ kg} / 988 \text{ kg/m}^3 = 4.357 \text{ m}^3$$

3. لحساب كثافة الطاقة بالنسبة إلى الكتلة أو الحجم نكتب:

$$q = Q / m = 300 \text{ kWh} / 4305.2 \text{ kg} = 0.07 \text{ kWh/kg}$$
$$q_v = Q / V = 300 \text{ kWh} / 4.357 \text{ m}^3 = 68.85 \text{ kWh/m}^3$$

الخزانات الحرارية ذات المواد الصلبة

إن المواد الصلبة كالخرسانة (البيتون) والتربة والحصى والغرانيت مناسبة لتخزين الحرارة عند درجات حرارة منخفضة. في الخزانات الحرارية ذات الأكوام المستخدمة في منشآت التدفئة الشمسية ذات المجمعات الهوائية يُمرَّر الهواء عبر كومة من حبيبات المادة حتى تضاف الحرارة إلى هذه الكومة أو تسحب منها. ونتيجة لارتفاع عامل انتقال الحرارة بين الهواء والمادة الصلبة، وبسبب كبر مساحة سطح الحبيبات، فإن درجة الحرارة بين الهواء والمادة الصلبة صغير. في التوضع الشاقولي المألوف يُمرَّر الهواء الساخن لشحن الخزان من الأعلى، ويمرَّر الهواء البارد لسحب (استجرار) الحرارة من الأسفل. إن درجة حرارة الجزء العلوي للخزان الحراري تكون دائماً أعلى منها في الجزء السفلي.

الخزانات الحرارية الفصلية

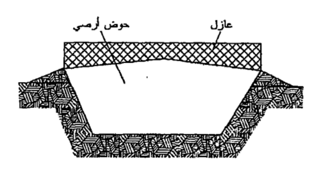
الأنواع الرئيسية لخزانات الحرارة الفصلية هي (الشكل 5.12):

ـــ الخزانات الحرارية في حاويات (صناديق) فوق صناديق

ـــ الخزانات الترابية

ـــ خزانات الماء تحت الأرض (أحواض أرضية، تجاويف صخرية، مستودعات الماء الأرضية).

الخزانات الطويلة الأمد تحفظ الحرارة المحسوسة في الماء بالأحواض أو مستودعات الماء الأرضية ويتراوح حجمها بين 500 m^3 و1200000 m^3. تحتاج الخزانات الحرارية الموجودة فوق الأرض حجماً كبيراً وعزلاً حرارياً بالغ الجودة. ولأسباب تتعلق بالمقاومة فإن حجم الخزان المصنوع من الخرسانة أو الفولاذ لا يتجاوز 100000 m^3. إن الاستهلاك لمادة العزل عالٍ جداً، ولذلك فإن التكاليف الاستثمارية للخزانات الحرارية الفصلية هي الأعلى بين الطرائق الأخرى. ولتقليل التكاليف تصمم الخزانات الفصلية بحيث تتوضع تحت الأرض.



الشكل 5.12 : خزان الحوض الأرضي للتخزين الفصلي للحرارة.

تُستخدم الأحواض الأرضية المملوءة بالماء كخزانات عالية درجة الحرارة وذات سعة تخزين كبيرة. تكون في الأحواض الأرضية النسبة بين السطح المغطى والحجم عاليةً عند مقارنتها بطرائق التخزين الأخرى. ولذلك يلزم العزل الحراري الجيد للغطاء والجزئي (على الأقل) للجوانب. إنها تحتاج عزلاً مضموناً للماء. يجب أن يحقق موقع حوض أرضي متطلبات معينة (القاعدة المستقرة، سهولة الحفر، عدم وجود مياه جوفية).

أما التجاويف الصخرية فهي مناسبة لتخزين الحرارة عند درجات حرارية عالية وبكميات كبيرة. ويتم الحصول على هذه التجاويف عن طريق التفجير أو الحفر ثم تملأ بالماء الساخن القادم من المجمّعات. تعمل المادة المحيطية (الغرانيت) كعازلٍ حراري وكخزانٍ في نفس الوقت.

المستودع الأرضي (Aquifer) هو بناء جيولوجي يقع تحت الأرض (صخور، صخور رملية، رمل) محاط بجريان بطيء للمياه الجوفية. لملء الخزان يساق الماء الدافئ من المجمعات الشمسية التي ليس لها غطاء شفاف والمسماة بممتصات الطاقة — عبر فتحات خاصة إلى هذه المستودعات، وبهذا يُزاح الماء الجوفي الموجود في المستودع الأرضي وتدفأ الصخور المحيطة (الصخر أو الرمل). أما تفريغ المستودع الأرضي فيتمّ إما من نفس فتحات ملئه أو عن طريق فتحات خاصة أخرى يُسترجَع منها الماء الدافئ. يتم التخزين في المستودعات الأرضية عند درجات حرارة منخفضة، ويلزم لذلك سعات تخزين كبيرة أو كبيرة جداً.

خزانات الحرارة الكامنة

من المناسب عند تخزين الحرارة الاستفادة من التغير الطوري: من صلب إلى سائل (الذوبان أو الانصهار) عند التعبئة (الشحن) أو من سائل إلى صلب (التجمد) عند تفريغ الخزان. عند شحن

خزان الحرارة الكامنة يُذوَّب وسيط الحرارة الكامنة وعند تفريغه يحدث تصلب لهذا المصهور عند ثبات درجة حرارة المصهور t_{meld} (للمواد النقية كيمائياً).

تحسب سعة التخزين لخزان الكامنة كما يلي:

$$Q_s = m\,[c_{solid}\,(t - t_{min}) + h_{melt} + c_{fl}\,(t_{max} - t_{melt})] \quad [J] \tag{21.12}$$

حيث: m كتلة وسيط تخزين الحرارة الكامنة

c_{solid}، c_{fl} السعة الحرارية النوعية للوسيط الصلب والسائل (على التوالي) [J/kgK]

h_{melt} الانتالبي النوعي لانصهار وسيط تخزين الحرارة الكامنة [J/kg]

t_{min}، t_{max} درجة حرارة التخزين الأصغرية والأعظمية [°C]

t_{melt} درجة حرارة انصهار وسيط تخزين الحرارة الكامنة [°C].

من أجل القيم المرتفعة لـ h_{melt} و C فإن الكتلة m والحجم V لوسيط تخزين الحرارة الكامنة اللازمين من أجل سعة تخزين محددة Q_s يكونان صغيرين.

تستخدم في مجال درجات الحرارة المنخفضة ماءات الأملاح اللاعضوية مثل Na، K، Ca، Mg والحموض الدهنية العضوية والبارافينات.

ويبين الجدول (3.12) كميات وسيط التخزين اللازمة لتخزين الحرارة عند درجات الحرارة المنخفضة.

الجدول 3.12: كميات وسائط التخزين اللازمة لتخزين GW 1 حرارة من أجل فرق في درجات الحرارة قيمته $\Delta t = 30$ K.

	وسائط تخزين الحرارة المحسوسة		وسائط تخزين الحرارة الكامنة	
	الماء	الصخور	$Na_2SO_4 \times 10H_2O$	بارافين
الكتلة [kg]	7933	39667	2200	2500
الحجم [m^3]	7.93	38.1 *	1.5	3.18

* هناك فراغ في كومة الصخور يبلغ 35%.

إن قيمة إنتالبي الانصهار المفيدة والمستخدمة لتخزين الحرارة h_{melt} عند درجات حرارة أدنى من 100 °C تكون في أكثر الأحيان أدنى من 100 kWh أو 360 MJ لكل 1 m³ من وسيط تخزين الحرارة الكامنة. عادةً تضاف الحرارة المحسوسة إلى الحرارة المخزنة والتي يحددها انتشار الحرارة

والسعة الحرارية النوعية. تتعلق كثافة الطاقة النوعية في خزانات الماء الساخن بانتشار الحرارة في الخزان Δt، فمن أجل $\Delta t = 70 - 20 = 50$ K، فإن الحرارة المحسوسة تبلغ 58.2 kWh أو 209.3 MJ لكل m^3 ماء.

تنشأ في خزانات الحرارة الكامنة ذات درجات الحرارة المنخفضة المشاكل التالية:

ـــ التبريد الإضافي للمصهور إلى ما دون درجة الانصهار عند التفريغ الحراري للخزان.

ـــ التغير الكبير في الحجم لوسيط تخزين الحرارة الكامنة عند تغير حالته الطورية.

ـــ تبادل الحرارة غير المناسب بين الناقل الحراري ووسيط تخزين الحرارة الكامنة.

يُثبّت السلوك الكيميائي والفيزيائي لماءات الأملاح اللاعضوية عن طريق إضافة مواد خاصة مناسبة لوسيط تخزين الحرارة الكامنة، وبذلك يرتفع عدد دورات التخزين. هنالك مواد أخرى تُحسِّن سلوك التبلور لوسيط تخزين الحرارة الكامنة.

وتستخدم في كثير من الأحيان خزانات حرارية ذات مادتين، وهذا يكون إما جمعاً بين وسطي تخزين حرارة محسوسة مثل الماء والخرسانة، أو الحصى أو الرمل مع الزيت. أو جمعاً بين وسطي تخزين أحدهما للحرارة المحسوسة والآخر للحرارة الكامنة مثل الماء والبارافين.

على سبيل المثال تصبح سعة التخزين الإجمالية لخزان فصلي يتألف من عدة فجوات حصى مملوءة بالماء كالتالي:

$$Q_{\text{total}} = (m_w\, c_{pw} + m_{\text{solid}}\, c_{\text{solid}})\,(t_{\max} - t_{\min})$$
$$= (V_w\, \rho_w\, c_{pw} + V_{\text{solid}}\, \rho_{\text{solid}}\, c_{\text{solid}})\,(t_{\max} - t_{\min}) \quad [\text{J}] \qquad (22.12)$$

حيث: m الكتلة

c_{solid} وc_{pw} السعة الحرارية النوعية للمادة الصلبة (دليلها solid) وللماء (الدليل w)

V الحجم

ρ الكتلة النوعية.

من أجل خزان حراري هجين (مختلط) يتألف من وسيط حرارة محسوسة (مثل الماء) ووسيط حرارة كامنة (مثل البارافين) فإن سعة التخزين الإجمالية تحسب كما يلي:

$$Q_{\text{total}} = \{m_s\, c_s\,(t_{\max} - t_{\min}) + m_l\,[c_{\text{solid}}\,(t_{\text{solid}} - t_{\min}) + h_{\text{melt}} + c_{fl}\,(t_{\max} - t_{\text{melt}})]\} \quad [\text{J}] \qquad (23.12)$$

حيث: m_s كتلة وسيط تخزين الحرارة المحسوسة

m_l كتلة وسيط تخزين الحرارة الكامنة

c_s السعة الحرارية النوعية لوسيط تخزين الحرارة المحسوسة

c_{solid} وc_{fl} السعة الحرارية النوعية لوسيط تخزين الحرارة الكامنة في الحالة الصلبة (Solid) أو السائلة (fl)

t_{max} و t_{min} درجتا الحرارة الأعظمية والأصغرية للخزان الحراري

t_{melt} درجة حرارة انصهار وسيط تخزين الحرارة الكامنة

h_{melt} انتالبي انصهار وسيط تخزين الحرارة الكامنة.

الخزانات الحرارية عند درجات الحرارة المتوسطة والعالية

في مجال درجات الحرارة المتوسطة (حتى 500 °C) تستخدم الطاقة الشمسية مثلاً لإنتاج الحرارة للعمليات الحرارية الصناعية أو للتبريد أو لتوليد الكهرباء. وبسبب الضياعات الحرارية الكبيرة فإنه من المناسب لتوليد الكهرباء بالطاقة الشمسية استخدام الخزانات الحرارية القصيرة الأمد (فترة تخزينها 0.5 إلى 3 ساعات).

الجدول 4.12: القيم المميزة لوسط التخزين في مجال درجات الحرارة المتوسطة.

وسيط التخزين	t_{melt} [°C]	h_{melt} [kJ/kg]	λ [W/mK]	C [J/kgK]	ρ [kg/m³]
وسائط التخزين ذات الحرارة الكامنة (أملاح صافية وخلائط)					
$LiNO_3$	252	530	1.33	2030	2130
KNO_3	337	150	0.43	1750	1860
NaCl	800	520	4	950	2160
(93.6/%6.4) $NaNO_3$/NaCl	294	171	0.61	1800	1880
(94.5/%4.5) KNO_3/KCl	320	150	0.48	1210	1890
(88/4.7/%7.3)KNO_3/KBr/KCl	342	140	1	1000	1887
وسائط التخزين الصلبة					
فولاذ/ حديد صب	–	–	35/45	550/500	7850/7800
خرسانة (بيتون)	–	–	2.1	1000	2400

ملاحظات:

1. t_{melt} درجة حرارة الانصهار، h_{melt} إنتالبي الانصهار

2. القيم المميزة للمواد (λ التوصيل الحراري، C السعة الحرارية النوعية، ρ الكتلة النوعية) منسوبة للحالة الصلبة.

عند درجة الحرارة حوالي 200 °C يمكن استخدام خزانات الماء الساخن والبخار، وفوق درجة الحرارة هذه وحتى 400 °C تستخدم في الوقت الحاضر وبشكل رئيسي خزانات الزيت. وتُستعمل في الخزانات ذات الضغط الجوي الزيوت المعدنية كوسيط تخزين، وذلك عند درجات حرارة أدنى من 300 °C، أما من أجل درجات الحرارة التي تزيد عن 400 °C فتستخدم خزانات تتعرض للضغط العالي وتُشغَّل بزيت حراري غالي الثمن. يمكن لمجال درجات الحرارة بين 300 و500 °C استخدام خزانات حرارة محسوسة تعمل بأملاح مصهورة ومعادن سائلة (الصوديوم).

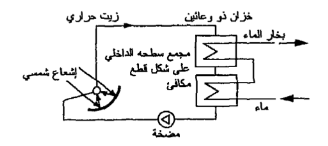
يبين الجدول (4.12) القيم المميزة لوسائط التخزين لمجال درجات الحرارة المتوسطة.

تتأثر أساليب التخزين المستخدمة في المحطات الشمسية بشكل كبير بالناقل الحراري وضغطه ومستوى درجة الحرارة.

يُستخدم كنواقل حرارية في المحطات الشمسية الهواء أو الملح (HITEC) أو الزيت الحراري أو الماء/البخار.

فمثلاً يتمّ تخزين الحرارة مباشرة عن طريق وسيط نقل حرارة المجمع أي الزيت الحراري في حوض تخزين يتألف من وعائين أحدهما حار والآخر بارد (الشكل 6.12).

تبلغ درجة الحرارة الأعظمية المسموح بها 400 °C.



الشكل 6.12 : الخزان ذو الحوضين (الوعائين) الذي يعمل عند درجات الحرارة المتوسطة.

إلى جانب الخزانات الحرارية ذات الحرارة المحسوسة ذات درجات الحرارة المتوسطة فإن خزافات الحرارة الكامنة تكتسب أهمية أيضاً.

تقوم وسائط التخزين بالحرارة الكامنة بتخزين الحرارة المحسوسة بالإضافة إلى إنتالبي الانصهار. من أجل درجات الحرارة التي تقع بين 280 و500 °C فمن المناسب استخدام نترات المعادن القلوية*

* المقصود بهذه المعادن: ليثيوم، صوديوم، بوتاسيوم، روبيديوم، سيزيوم، فرانسيوم، (المترجم).

أو نترات المعادن القلوية الأرضية**.

في عملية تخزين الحرارة الكامنة تكون استطاعة التعبئة (الشحن) والتفريغ محدودة بسبب الانتقال السيئ للحرارة بين ناقل الحرارة ووسيط التخزين.

في مجال درجات الحرارة المتوسطة تُستخدم كذلك هيدرات المعادن (مثل MgH_2) كوسائط تخزين في الخزانات الحرارية ــ الكيميائية.

وفي مجال درجات الحرارة 500 حتى 1300 °C يمكن استعمال خزانات الحرارة المحسوسة ذات المواد السيراميكية مثل Al_2O_3، SiO_2، MgO. في الخزانات الحرارية التي تستخدم مادتين مع ملح كوسيط حرارة كامنة في مسام مادة البناء السيراميكية يمكن الحصول على كثافة طاقة مرتفعة، ولذلك فإن الكمية اللازمة من وسيط التخزين أقل بكثير منها في خزانات الحرارة المحسوسة.

مثال 3.12

يُطلب تحديد مواصفات خزان الحرارة الكامنة لمنشأة شمسية ذات درجة حرارة وسطية. سعة التخزين اللازمة 2 MWh، ودرجة الحرارة القصوى للعمل هي 260 °C.

ما هو وسيط الحرارة الكامنة الأنسب للاستخدام؟

وما هي كتلة هذا الوسيط؟

يُشار إلى أنه لا يجوز أن يتجاوز فرق درجات الحرارة Δt لوسيط الحرارة الكامنة في دورة تخزين القيمة 20 K.

الحل

1. يتم اختيار أنسب وسيط حرارة كامنة من الجدول (4.12) وهو $LiNO_3$ الذي تبلغ درجة حرارة انصهاره $t_{melt} = 252$ °C، انتالبي انصهاره $h_{melt} = 530$ kJ/kg، السعة الحرارية النوعية $c = 2030$ J/kg K.
2. تحسب كثافة الطاقة المنسوبة للكتلة من أجل خزان الحرارة الكامنة كما يلي:

$$Q = c\,\Delta t + h_{melt}$$
$$= 2.03 \text{ kJ/kg K} \times 20 \text{ K} + 530 \text{ kJ/kg} = 570.6 \text{ kJ/kg}$$

** المقصود بهذه المعادن: معادن المجموعة الثانية في الجدول الدوري أي: بيريليوم، مغنـــزيوم، كالسيوم، سترونشيوم، باريوم، راديوم (المترجم).

3. الكتلة اللازمة لوسيط الحرارة الكامنة:

$$M = Q / q$$

$$= 2\ \text{MWh} \times 3600\ \text{s/h} \times 1000\ \text{kJ/MJ} / 570.6\ \text{kJ/kg} = 12618.3\ \text{kg}$$

تخزين الطاقة الحراري ــ الكيميائي

يمكن تخزين الطاقة بسبب التفاعلات الكيميائية العكوسة ذات انتالبي التفاعل ذي القيمة الكبيرة، وتستخدم الطاقة في هذه العملية لإجراء تفاعل كيميائي ماص للحرارة (endothermic) وتُخزَّن نواتج الاحتراق. وفي التفاعل المُطلِق للحرارة (exothermic) تستعاد الحرارة ثانية.

محاسن خزانات الطاقة الحرارية ــ الكيميائية هي:

ــ ارتفاع كثافة الطاقة المنسوبة إلى الحجم.

ــ عدم حدوث ضياعات طاقة أثناء تخزين نواتج التفاعل.

تعتبر أنواع التفاعلات العكوسة التالية مناسبة من أجل التخزين الحراري ــ الكيميائي للطاقة:

ــ نزع الهيدرات من هيدرات الأملاح والحموض (مثلاً $Na_2S \cdot 5H_2O$، $H_2SO_4 \cdot H_2O$).

ــ اختزال ماءات المعادن (مثل $Ca(OH)_2$).

ــ التفكك الحراري للغازات (مثلاً $SO_3 \leftrightarrow SO_2 + {}^1/_2O_2$)

ــ التفكك (تحلل) الأملاح (مثلاً $CaCO_3$، $MgCO_3$، $CaCl_2 \cdot 8NH_3$).

وهذه بعض الأمثلة لهذه التفاعلات:

$Na_2S \cdot 5H_2O \leftrightarrow Na_2S + 5H_2O$ (كثافة الطاقة $500\ Wh/m^3$)

$H_2SO_4 \cdot H_2O \leftrightarrow H_2SO_4 + H_2O$ (كثافة الطاقة 300 Wh/m3)

$Ca(OH)_2 \leftrightarrow CaO + H_2O$ (كثافة الطاقة 250 Wh/m3)

تخزين الطاقة باستخدام أنبوب حرارة كيميائي

يمكن استخدام أنبوب حرارة كيميائي على سبيل المثال لتخزين الطاقة الشمسية عن طريق دورة عمل حرارية ــ كيميائية. يستخدم الإشعاع الشمسي المركز في مفاعل ذي درجة حرارة عالية لتهذيب الغاز الطبيعي بواسطة وسيط كيميائي (catalylic reforming)، وهكذا يجري التفاعل الماص للحرارة بين الميتان وبخار الماء عند درجة حرارة 960 °C:

$$CH_4 + H_2O = CO + 3H_2 - 6020\ \text{kJ/kg CH4} \quad (24.12)$$

يستخدم خليط أول أوكسيد الكربون CO والهيدروجين H_2 كحامل للطاقة. يتم في منطقة الاستهلاك في مفاعل ذي وسيط كيميائي تشكل الميتان من CO وH_2 وتنطلق بذلك كمية من الحرارة.

يستخدم الروديوم أو النيكل كوسائط محفزة (حفازات) في كلا المفاعلين (المهذّب وصانع الميتان).

4.12 خزانات البخار

خزان البخار الفائض عند انخفاض الحمل على العنفة البخارية

يتم تخزين الحرارة في خزان للماء الساخن، وتتألف دورة التخزين من عملية الملء والتخزين والتفريغ.

يتم الملء (الشحن) بتمرير البخار عبر فوهات بخار إلى داخل حوض الخزان وبذلك ترتفع قيمة الضغط فيه من p_1 إلى p_2 وعند ملامسة الماء المباشرة فإن البخار يتكاثف، ويؤدي تلقي حرارة التكاثف إلى رفع درجة الحرارة من t_1 إلى t_2 الانتالبي من h_1 إلى h_2.

تعطي معادلة موازنة الطاقة عند شحن الخزان كمية البخار المضافة:

$$m_V = m_{W1}\,(h_1 - h_2) / (h_V - h_2) \quad [kg] \qquad (25.12)$$

حيث: m_{W1} كتلة الماء في حوض التخزين عند بدء عملية التخزين وعند p_1 و t_1 [kg]

h_1 وh_2 الانتالبي النوعي للماء عند بدء الشحن وعند النهاية [kJ/kg]

h_V الانتالبي النوعي للبخار المضاف [kJ/kg].

عندما يكون الخزان مملوءاً توجد فيه الكتلة $m_{W2} = m_{W1} + m_v$ من الماء الذي يغلي عند p_2 وt_2.

وعند تفريغ الخزان يسحب البخار من حجرته مما يؤدي إلى تناقص الضغط في الخزان من p_2 إلى $p = p_2 - \Delta p$ ويحدث أثناء التناقص الكظيم للضغط تبخر لجزء من الماء ريثما تصبح درجة الحرارة في الخزان مساوية لدرجة حرارة الإشباع عند الضغط p.

تنتج كتلة البخار المشبع بواسطة إجراء موازنة للطاقة أثناء عملية التفريغ.

كمثال عن مواصفات منشأة ذات خزان للبخار الفائض في محطة نووية استطاعتها الكهربائية 400 MW نسوق المعطيات التالية: تتألف المنشأة من 4 خزانات حجم كل منها 580 m^3 و8 خزانات تحميص حجم كل منها 180 m^3. ضغط الشحن ودرجة حرارته كالتالي 20 bar و212 °C

أو 48 bar و 260 °C . كما يكفي محتوى الطاقة لمنشأة التخزين لتشغيل محطة توليد الكهرباء لمدة ساعتين.

13 استخدام الطاقة بشكل اقتصادي وفعّال

1.13 المحافظة على مصادر الطاقة والبيئة

يعطي الجدول (1.13) استهلاك الطاقة بحسب مجموعات المستهلكين ومجالات الاستخدام وذلك في ألمانيا الغربية (سابقاً).

يمكن تحقيق وفر في الطاقة الأولية وذلك عن طريق استخدام فعّال لها، ويمكن الحدّ من الهدر عن طريق:

- تجنب الاستهلاك غير الضروري
- تخفيض الاستهلاك النوعي للطاقة
- تحسين المردود
- تخفيض ضياعات الطاقة
- الاستفادة من الطاقة المسترجعة.

الجدول 1.13: استهلاك الطاقة بحسب فئة المستهلك ومجال الاستخدام في ألماني الغربية سابقاً (عام 1991).

المستهلك	الاستهلاك بـ 10^{15} J	منها بالـ % قوة محركة	تسخين + تدفئة	عمليات حرارية صناعية	إنارة
الإجمالي	7.83	37.8	32.2 + 5.2	22.9	1.9
الصناعة	2.27	19.4	10.1 + 0.7	68.2	1.6
الاستهلاك المنزلي	2.12	6.0	76.6 + 12.2	3.7	1.5
المواصلات	2.13	99.7	0.1	–	0.2
الباقي	1.31	20.6	50.5 + 10.1	13.0	5.8

يؤدي الاستخدام الاقتصادي والعقلاني للطاقة إلى تقليل انبعاث المواد الضارة والغازات المؤثرة على المناخ والبيئة. (وبشكل خاص CO_2).

2.13 تحسين العزل الحراري في الأبنية والأنابيب

العزل الحراري في الأبنية والبيوت ذات الاستهلاك المنخفض للطاقة

يتراوح الاستهلاك الحراري لتدفئة المنازل في ألمانيا بين 220 و270 kWh لكل m^2 من مساحة السكن، أما استهلاك الطاقة لتدفئة المنازل فهو يرتبط بعوامل كثيرة مثل تكتّل وعدم تبعثر البناء وخواص العزل وقدرة السطوح الخارجية للبناء على تخزين الحرارة ودرجة الاستفادة من جمل التدفئة والتهوية واستخدام طاقة الشمس والوسط المحيط، بالإضافة إلى سلوك المستهلك نفسه. يكون استخدام الطاقة إيجابياً ومفضلاً إذا اجتمعت المواصفات الفيزيائية المثلى لبناء من حيث اختيار أبعاد الغلاف الخارجي له، مع التصميم الداخلي الجيد بما يتماشى مع الاستفادة الفعالة والبسيطة من الجمل الشمسية. كلما قلّت النسبة بين مساحة غلاف البناء وحجمه كلما كان البناء أكثر تراصاً (compact). عند تساوي السطح المفيد فإن الضياعات الحرارية في البناء الأكثر تراصاً تكون أقل. وبالتالي فإن عامل نفوذ الحرارة من الأبنية ذات المساكن المتعددة أقل منه في البيوت المنفردة (مسكن لأسرة واحدة).

يمكن الإقلال من استهلاك الحرارة لتدفئة منزل ما عن طريق بعض الإجراءات مثل الوفر في استهلاك الطاقة والاستفادة السلبية (passive) الممكنة من الطاقة الشمسية. تدعو النظم والقواعد المتعلقة بالمحافظة على الحرارة في ألمانيا إلى الحد الشديد من استهلاك الحرارة السنوي لتدفئة المنازل وإلى الإقلال ما أمكن من القيم المسموح بها لعامل نفوذ الحرارة k لأجزاء الأبنية المختلفة. والقيم المطلوب اتباعها قريبة من تلك النافذة لما يسمى "البيوت ذات الاستهلاك المنخفض للطاقة" والتي تتطلب جزءاً صغيراً فقط من الطاقة اللازمة للتدفئة التي تستهلكها البيوت التقليدية. في البيوت ذات الاستهلاك المنخفض للطاقة والتي تبنى على مبدأ العزل الحراري الأمثل، والوفر الأعظمي بالطاقة عن طريق التهوية المتحكم بها واستعادة الحرارة والاستفادة من الطاقة الشمسية، يتراوح استهلاك الحرارة للتدفئة سنوياً بين 30 و70 kWh لكل m^2 من مساحة السكن.

تبلغ التكاليف الإضافية لبناء هذا النوع من البيوت 3 إلى 8 % من تكاليف البيوت المألوفة. يتطلب هذا النوع من البيوت العزل الحراري الجيد للجدران الخارجية للبناء بحيث تصبح كتيمة للهواء والريح، كذلك يجب تجنب الجسور الحرارية (المواقع ذات المقاومة الحرارية المنخفضة)، والتحكم بالتهوية والاستفادة السلبية (passive) من الطاقة الشمسية. تُخفّض في هذه البيوت إلى

الحد الأدنى ضياعات انتقال الحرارة وذلك عن طريق العزل الأمثل للغلاف الخارجي، وإغلاق الجسور الحرارية في أجزاء البناء (منع تهريب الحرارة). كذلك يتم تقليل الضياعات الحرارية مع التهوية عن طريق غلاف يعيق تسرب الريح، بالإضافة إلى ضبط جملة التهوية والتحكم بها بحيث لا يتجاوز عامل تجديد (تغيير) الهواء 1/h – 0.5. كذلك يجب أن يصمم هذا المترل من الناحية المعمارية بحيث يُستخدم الإشعاع الشمسي المار عبر النوافذ في الشتاء للتدفئة بشكل أمثل، وأن يُحجب في الصيف تفادياً للحرارة الزائدة.

إذا أمكن تأمين التيار الكهربائي والحرارة بشكل كامل عن طريق طاقة الشمس والمحيط عندها يتم الحصول على ما يسمى "البيت ذي الطاقة المعدومة". وشروط ذلك، عزل حراري أمثل واستخدام مصادر الطاقة الداخلية، واسترجاع الحرارة واستخدام منشآت فوتوفولطية وشمسية لتأمين الماء الساخن والتدفئة (عن طريق خزانات حرارة فصلية مصممة بالشكل الأمثل).

تتألف حرارة التدفئة لبناء ما من الحرارة اللازمة للتهوية والحرارة المنتقلة عبر جدران البناء:

$$Q_H = Q_T + Q_V = (k_m A_{Build} + z\, c_p\, V)\,(t_{in} - t_{ext}) \quad [W] \qquad (1.13)$$

حيث: k_m عامل نفوذ الحرارة الوسطي للبناء [W/m²K]

A_{build} مساحة الغلاف الخارجي للبناء [m²]

V حجم البناء [m³]

z عامل تجديد الهواء [1/h] (بين 0.5 أو 1 في الساعة)

c_p السعة الحرارية النوعية للهواء [Wh/m³K] (قيمته 0.34 Wh/m³K)

t_{in} وt_{ext} درجة الحرارة الداخلية والخارجية [°C].

يُحسب عامل نفوذ الحرارة الوسطي k_m من قيم k لأجزاء البناء المختلفة (الجدار الخارجي، النافذة، السقف) وسطوحها كما يلي:

$$K_m = \Sigma\,(k\,A)\,/\,A_{Build} \qquad (2.13)$$

يتم إنقاص استهلاك الحرارة بالنقل من سطح البناء عن طريق تحسين عملية العزل الحراري. ولهذا يُستخدم الزجاج المملوء بغاز خامل الذي تبلغ قيمة k له 1.4 إلى 0.7 W/m²K، أما السطوح غير الشفافة من البناء فيتم عزلها حرارياً بالشكل الأمثل. أما سماكة العازل لأجزاء البناء واللازمة

لإنقاص عامل نفوذ الحرارة عن القيمة الأصلية k (بدون عازل) إلى قيمة مرغوبة (أكثر محافظة على الحرارة)، فتحدد بمقارنة المقاومات الحرارية كما سنورد فيما يلي.

تُحسب المقاومة الحرارية الإجمالية (بالـ m^2W/K) كما يلي:

آ - بدون عازل

$$R = 1 / k = 1 / \alpha_i + \sum (\delta / \lambda) + 1 / \alpha_{ext} \quad (3.13)$$

ب - مع عازل (تحسين المحافظة على الحرارة)

$$R_{isol} = 1 / k_{isol} = 1 / \alpha_{in} + \sum (\delta / \lambda) + (\delta / \lambda)_{isol} + 1 / \alpha_{ext} \quad (4.13)$$

حيث: k، k_{isol} عامل نفوذ الحرارة بدون عازل أو معه [W/m^2K]

α_{in}، α_{ext} عامل انتقال الحرارة في داخل الغرفة وخارجها [W/m^2k]

(δ / λ) مجموع المقاومات الحرارية لطبقات البناء (δ سماكة الطبقة [m])

λ عامل توصيل الحرارة لمادة البناء [W/mk]

δ_{isol} سماكة العازل [m]

λ_{isol} عامل توصيل الحرارة لمادة العزل [W/mk].

تصبح السماكة اللازمة للعازل كما يلي:

$$\delta_{isol} = \lambda_{isol} (R_{isol} - R) = \lambda_{isol} (1/ k_{isol} - 1 / k) \quad [m] \quad (5.13)$$

يمكن التقليل من الحرارة اللازمة للتهوية (تجديد الهواء) بتخفيض عامل تغيير الهواء z ومن أجل ذلك تلزم تهوية مضبوطة مع تسخين أولي للهواء البارد من طريق الحرارة الضائعة مع الهواء المطروح التي يتم استرجاعها في مبادل حراري خاص.

يتناسب الوفر في الطاقة بواسطة العزل الأفضل طرداً مع الفرق بين قيمة k للبناء العادي وقيمة k للبناء المعزول جيداً.

يمكن باستخدام درجات الحرارة القياسية في الداخل والخارج وبالاستعانة بالمعادلة 1.13 حساب الاستهلاك الحراري القياسي (Norm) Q_N بالواط وكذلك عدد ساعات الاستخدام الكلي في العام كما يلي:

$$Q_{H,Y} = Q_N \, b \quad [Wh/a] \quad (6.13)$$

مثال 1.13

ما هي السماكة المطلوبة للعازل حتى يمكن تخفيض الضياعات الحرارية من جدار خارجي بمقدار 80 %. القيمة الأولية لـــ k (قبل العزل) للجدار الخارجي 1.4 W/m^2K، وعامل التوصيل الحراري للعازل 0.04 W/mK.

الحل

نحسب تيار الضياع الحراري من الجدار الخارجي بدون ومع عزل كما يلي:

$$Q = k\,A\,\Delta t \text{ ،} Q_{isol} = k_{isol}\,A\,\Delta t$$

$$Q_{isol} = 0.2\,Q$$

وبالتالي ينتج عامل نفوذ الحرارة مع عزل كما يلي:

$$K_{isol} = 0.2\,k = 0.2 \times 1.4 = 0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$$

أما سماكة العازل:

$$\delta_{isol} = \lambda_{isol}\,(1 / k_{isol} - 1 / k)$$
$$= 0.04\,(1 / 0.28 - 1 / 1.4) = 0.114 \text{ m}$$

عزل الحرارة في الأنابيب

سندرس فيما يلي حالتين: الضياعات الحرارية في أنبوب غير معزول وآخر معزول. تنشأ الضياعات الحرارية بسبب فرق درجات الحرارة بين المائع الساخن (ماء ساخن، بخار، هواء) ضمن الأنابيب والهواء الخارجي. يتحدد تيار الضياعات الحراوية بمعرفة فرق درجات الحرارة بين المائع والهواء الخارجي ومساحة سطح الأنابيب والمقاومة الحرارية الإجمالية.

تبين المعادلة التالية كيفية حساب كثافة تيار الضياعات الحرارية بالنسبة إلى 1 m من طول الأنابيب:

$$q_l = Q / L \quad [\text{W/m}] \tag{7.13}$$

حيث: Q تيار الضياعات الحرارية [W]

L طول الأنابيب [m].

أما تيار الضياعات الحرارية فهو يحسب كما يلي:

$$Q = L\,(t_F - t_{air}) / [1/ \pi d_i\,\alpha_{in} + (1 / 2\,\pi \lambda)\ \ln (d_{ext} / d_{in}) + 1 / \pi d_{ext}\,\alpha_{ext}]$$
$$= L\,(t_F - t_{air}) / (R_{in} + R_w + R_{ext}) \quad [\text{W}] \tag{8.13}$$

حيث: t_F وt_{air} درجة حرارة المائع والهواء الخارجي [°C]

d_{in}، d_{ext} القطر الداخلي والخارجي للأنبوب [m]

α_{in}، α_{ext} عامل انتقال الحرارة للمائع إلى السطح الداخلي للأنبوب أو من السطح الخارجي للأنبوب إلى الهواء [W/m²k]

R_w، R_{in}، R_{ext} المقاومة الحرارية لجدار الأنبوب، ولانتقال الحرارة عند السطح الداخلي أو الخارجي للأنابيب [mK/W].

تُحسب المقاومات الحرارية بالنسبة لـ 1 m من طول الأنبوب (بالـ mK/W) كما يلي:

- لجدار الأنبوب

$$R_w = (1 / 2\pi\lambda) \ln (d_{ext} / d_{in}) \quad (9.13)$$

- من أجل انتقال الحرارة من المائع الساخن (مثلاً الماء الساخن) إلى السطح الداخلي لجدار الأنبوب:

$$R_{in} = 1 / \pi\, d_{in}\, \alpha_{in} \quad (10.13)$$

- لانتقال الحرارة من السطح الخارجي لجدار الأنبوب إلى الهواء البارد:

$$R_{ext} = 1 / \pi\, d_{ext}\, \alpha_{ext} \quad (11.13)$$

تكون في العادة قيم R_w وR_i أصغر بكثير من R_{ext} بحيث يمكن إهمالها (R_w، R_i)، وبالتالي يمكن اعتبار t_{ext} أي درجة حرارة السطح الخارجي للأنبوب مساوية تقريبا لـ t_F.

ولحساب تيار الضياعات الحرارية من الأنابيب غير المعزولة يمكن بشكل تقريبي كتابة:

$$Q \approx \alpha_{ext}\, \pi\, d_{ext}\, L\, (t_F - t_{air}) \quad [W] \quad (12.13)$$

يتألف عامل انتقال الحرارة الإجمالي من مقدارين:

$$\alpha_{ext} = \alpha_c + \alpha_{Rad} \quad [W/m^2K] \quad (13.13)$$

حيث: α_c وα_{Rod} عامل انتقال الحرارة بالحمل والإشعاع وذلك من السطح الخارجي للأنبوب إلى الوسط المحيط [W/m²K].

من أجل الحمل الحر للهواء:

$$\alpha_c = Nu\, \lambda / l = m\, Ra^n\, \lambda / l \quad (14.13)$$

حيث: Nu رقم نوسيل

λ عامل التوصيل الحراري للهواء

l الطول المميز (القطر للأنابيب الأفقية، الطول للأنابيب الشاقولية)

Ra رقم ريليه

m و n أرقام مرتبطة بـــ Ra (انظر الجدول 2.1).

يُحسب تيار الحرارة المنتقلة بالإشعاع كما يلي:

$$Q_{Rad} = A_{ext}\, \varepsilon\, C_o\, [(T_O / 100)^4 - (T_{air} / 100)^4] \quad [W] \tag{15.13}$$

حيث: $A_{ext} = \pi\, d_{ext}\, L$ السطح الخارجي للأنبوب (حوالي 0.9)

$C_o = 5.67\ W/m^2K$ عامل إشعاع الجسم الكامل السواد

T_O و T_{air} درجة حرارة السطح الخارجي للأنبوب وللهواء.

وبطريقة تقريبية:

$$Q_{Rad} = 0.5\, A_{ext}\, \varepsilon\, C_o\, (T_O + T_{air})^3 \quad [W] \tag{16.13}$$

أما عامل انتقال الحرارة بالإشعاع فيحسب كما يلي:

$$\begin{aligned} \alpha_{Rad} &= Q_{Rad} / A_{ext}\, (T_o - T_{air}) \\ &= 0.5\, A_{ext}\, \varepsilon\, C_o\, (T_O + T_{air})^3\, (T_O - T_{air}) \quad [W/m^2K] \end{aligned} \tag{17.13}$$

مثال 2.13

يُطلب حساب تيار الضياعات الحرارية لأنبوب ماء ساخن غير معزول قطره الخارجي $d_{ext} = 80\ mm$ وطوله $L = 20\ m$. درجة حرارة السطح الخارجي لهذا الأنبوب $t_F = 200\ °C$، درجة حرارة الهواء $t_{air} = 20\ °C$، عامل انتقال الحرارة الإجمالي $\alpha_{ext} = 18\ W/m^2K$ وذلك من الأنبوب إلى الهواء.

الحل

يحسب تيار الضياع الحراري كما يلي:

$$\begin{aligned} Q &= \pi\, \alpha_{ext}\, d_{ext}\, L\, (t_F - t_{air}) \\ &= \pi\, 18\ W/m^2K \times 0.08\ m \times 20\ m\ (200 - 20)K = 162860\ W \end{aligned}$$

تكون المقاومة الحرارية في الأنابيب المعزولة أعظمية في مادة العزل، ودرجة حرارة السطح الخارجي للأنبوب أصغر بكثير من درجة حرارة المائع t_F.

ولحساب كثافة التيار الحراري بالنسبة لـــ 1 m من طول الأنابيب المعزولة نكتب:

$$q_l = Q / L = (t_F - t_{air}) / [1 / \pi\ d_{in}\ \alpha_{in} + (1 / 2\ \pi \lambda_w)$$

$$\ln (d_{ext} / d_{in}) + (1 / 2\ \pi \lambda_{isol}) \ln (d_{isol} / d_{ext}) + 1 / \pi\ d_{isol} \alpha_{ext} \quad (18.13)$$

حيث: $d_{isol} = d_{ext} + 2\delta_{isol}$ قطر الأنبوب المعزول [m]

δ_{isol} سماكة العازل

λ_w وλ_{isol} عامل التوصيل الحراري لجدار الأنبوب أو للعازل [W/mK].

وبشكل بديل يمكننا كتابة:

$$q_l = (t_F - t_{air}) / (R_{in} + R_w + R_{isol} + R_{ext}) \quad (19.13)$$

حيث: R_w وR_{isol} المقاومة الحرارية لجدار الأنبوب أو للعازل (بالنسبة لـــ 1 m من طول الأنبوب) [mk / W]

R_{in} وR_{ext} المقاومة الحرارية لعملية انتقال الحرارة عند الجانب الداخلي أو الخارجي للأنبوب (بالنسبة لـــ 1 m من طول الأنبوب) [mK/W].

إذا أهملت R_w و R_{in} بالنسبة لـــ R_{isol} وR_{ext} تصبح:

$$q_l \approx (t_F - t_{air}) / (R_{isol} + R_{ext}) = (t_O - t_{air}) / R_{ext} \quad [W/m] \quad (20.13)$$

ولحساب درجة حرارة السطح الخارجي للأنبوب:

$$t_o = t_{air} + (t_F - t_{oir})\ R_{ext} / (R_{isol} + R_{ext})$$

$$= t_{air} + (t_F - t_{air}) / [1 + (d_{isol}\ \alpha_{ext} / 2\ \lambda_{isol}) \ln (d_{isol}/d_{ext})] \quad [°C] \quad (21.13)$$

ولحساب تيار الضياعات الحرارية:

$$Q = \pi\ \alpha_{ext}\ d_{isol}\ L\ (t_O - t_{air}) \quad [W] \quad (22.13)$$

مثال 3.13

تـــخفض الضياعـــات الحراريـــة من الأنبوب الوارد في المثال 2.13 عن طريق عازل سماكته $\delta_{isol} = 50$ mm وعامل توصيله للحرارة $\lambda_{isol} = 0.04$ W/mK.

ما هو تيار الضياعات الحرارية للأنبوب المعزول؟

الحل

القطر الخارجي للأنبوب المعزول:

$$d_{isol} = d_{ext} + 2\ \delta_{isol}$$
$$= 0.08\ m + 2 \times 0.05\ m = 0.18\ m$$

وتحسب درجة حرارة السطح الخارجي للأنبوب المعزول وفقاً للمعادلة (12.13) كما يلي:

$$t_O = 20°C + (200 - 20)K\ /\ [\ 1 + (0.18\ m \times 18\ W/m^2K\ /\ 20.04\ W/mK)$$
$$\ln (0.18\ m\ /\ 0.08\ m)] = 25.3°C$$

أما تيار حرارة الضياعات:

$$Q = \pi\ \alpha_{ext}\ d_{isol}\ L\ (t_O - t_{air})$$
$$= \pi\ 18\ W/m^2K \times 0.18\ m \times 20\ m\ (25.3 - 20)K = 539.5\ W$$

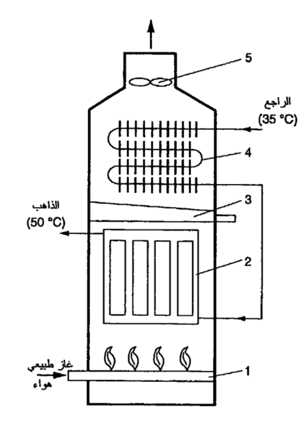
3.13 أجهزة التدفئة الاقتصادية

تحصل في مراجل التدفئة القديمة ضياعات طاقة كبيرة. فيمكن مثلاً أن تصل الضياعات مع غازات الاحتراق إلى 12 وحتى 15 %، ومع الإشعاع والتحضيرات 10 إلى 23 %، بحيث يصل المردود إلى 62 وحتى 76 % فقط. وغالباً ما تكون المراجل المستخدمة أكبر من المطلوب وغير متناسبة بالأصل مع الحرارة المطلوبة، وبسبب ذلك يزداد الاستهلاك الحراري السنوي بحدود 30 %. كذلك لا يتم في كثير من الأحيان تنظيم توزيع الحرارة بشكل صحيح. بالإضافة إلى ذلك يساهم العزل الخاطئ أو عدم وجوده أصلاً إلى زيادة الضياعات الحرارية. ويصل مردود الاستفادة السنوي في منشآت التدفئة القديمة حتى حوالي 60 % أما في المنشآت المُحدَّثة فيصل إلى حوالي 89 %.

تغطي تقانة التدفئة الحديثة الحاجات الحرارية للغرف وللعمليات الحرارية الصناعية بشكل اقتصادي وملائم للبيئة. كما يُمكّن استخدام هندسة التحكم من المواءمة بين توليد الحرارة والحاجة الفعلية لها.

تُنظّم في مراجل التدفئة ذات درجات الحرارة المنخفضة درجة حرارة دخول الماء إلى مرجل التسخين، بحيث تتواءم مع الاستهلاك الحراري الذي يتعلق بدرجة حرارة الهواء الخارجي. يمكن أن تستخدم في مراجل حرق الغاز القيمة الحرارية العليا للغاز التي تزيد 10 إلى 12 % عن القيمة الحرارية الدنيا LCV، ولذلك يكون مردود مراجل الغاز مرتفعاً ويصل إلى 105 حتى 110 % (منسوباً إلى القيمة الحرارية الدنيا للوقود). يبين الشكل (1.13) طريقة عمل مرجل الغاز، حيث يتم تبريد غازات الاحتراق عند درجة حرارة منخفضة للماء العائد إلى 50 °C، وهكذا يتكاثف

بخار الماء الموجود في غازات الاحتراق ويُستفاد من حرارة تكاثف بخار الماء في تسخين الماء تسخيناً أولياً. يجب أن يكون المسخن الأولي للماء مصنوعاً من مادة مقاومة للصدأ، وتتمتع مراجل الغاز الحديثة ذات درجات الحرارة المنخفضة بمردود عالٍ.



الشكل 1.13 : مخطط يبين مبدأ عمل مراجل الاستفادة من القيمة الحرارية العليا للغاز.

فمثلاً تبلغ الضياعات مع غازات الاحتراق 7 إلى 9 % بينما تبلغ ضياعات الإشعاع والتحضير 1 إلى 2 %، وبالتالي يبلغ المردود 89 إلى 92 %.

عناصر منشأة التدفئة التي تساهم في وفر الطاقة وحماية البيئة هي:

- الخزان الحراري
- المبادل الحراري الذي يستفيد من حرارة غازات الاحتراق وحرارة تكاثفها (أي من القيمة الحرارية العليا للوقود)
- الحراق الذي يطلق قدراً ضئيلاً من المواد الضارة (حراقات حديثة)
- أجهزة التحكم التي توائم بين عمل منشأة التدفئة وحالة الجو.

يؤدي استخدام هذا النوع من المراجل إلى استخدام أفضل للوقود وإلى وفر في الطاقة بمقدار 20 إلى 25 %.

عند توزيع الحرارة تجري المحاولة قدر الإمكان إلى تخفيض درجة حرارة الماء المغادر للمرجل.

بواسطة المواءمة المثلى بين عناصر المرجل يمكن تحقيق التوافق الجيد بين الحرارة المتولدة والاستهلاك الفعلي للحرارة. لتدفئة الغرف الكبيرة في المنشآت الصناعية يمكن استخدام التدفئة بالهواء الساخن، وهذه الطريقة مناسبة خاصة عندما يكون هناك تغير كبير لدرجات الحرارة أو للغرف التي تستخدم لأوقات قصيرة. وفي هذه الحالة فإنه من المناسب استخدام عدة مسخنات هواء صغيرة بدلاً من جهاز كبير.

في المثال التالي (4.13) سيُعرَض حساب الوفر السنوي في تكاليف الطاقة لمرجل حرق الوقود الغازي مع الاستفادة من القيمة الحرارية العليا للغاز.

مثال 4.13

يُستعاض في جملة تدفئة عن مرجل تدفئة تقليدي درجة الاستفادة منه $\eta_{conv} = 80\ \%$ بمرجل يحرق الغاز درجة الاستفادة منه $\eta_{G,SG} = 104\ \%$ (منسوباً إلى القيمة الحرارية الدنيا للوقود).

ما هو الوفر السنوي في استهلاك الطاقة؟ عندما يكون الاستهلاك المعياري للحرارة $Q_N = 50$ kW. عدد ساعات الاستخدام في السنة $b = 1640$ h/a وكلفة الغاز الطبيعي $C = 0.7$ DM/m^3.

القيمة الحرارية الدنيا للوقود الغازي 36 MJ/m^3.

الحل

1. الاستهلاك السنوي للحرارة من أجل التدفئة:

$$Q_H = Q_N\, b$$
$$= 50 \text{ kW} \times 1640 \text{ h/a} = 82000 \text{ kWh/a}$$

2. الاستهلاك السنوي للوقود:

– عندما تستخدم مجموعة التدفئة مرجلاً تقليدياً:

$$B_{conv} = Q_H / \text{LCV}\ \eta_{conv}$$
$$= 82000 \text{ kWh/a} \times 3600 \text{ s/h} / (36000 \text{ kJ/m}^3 \times 0.8) = 102500 \text{ m}^3\text{/a}$$

– عند استخدام مرجل الاستفادة من القيمة الحرارية العليا للغاز:

$$B_{G,SG} = Q_H / LCV \, \eta_{G,SG}$$

$$= 82000 \text{ kWh/a} \times 3600 \text{ s/h} / (36000 \text{kJ/m}^3 \times 1.04) = 78846 \text{ m}^3\text{/a}$$

3. الوفر السنوي في الطاقة عند استخدام المرجل الجديد:

$$\Delta B = (B_{conv} - B_{G,SG})\, C$$

$$= (102500 \text{ m}^3\text{/a} - 78846 \text{ m}^3\text{/a})\ 0.7 \text{ DM/m}^3 = 16557.8 \text{ DM/a}$$

4.13 استرجاع الحرارة والمضخات الحرارية

يجري استرجاع الحرارة من هواء الغرف المطروح أو هواء العمليات الصناعية أو من الماء المطروح في مختلف المنشآت.

تتعلق درجة الحرارة الضائعة بالعملية والمنشأة (انظر الجدول 2.13).

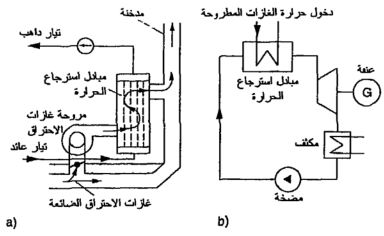
الجدول 2.13: درجات الحرارة النمطية للهواء الضائع، للغازات الضائعة، للماء المطروح

العملية/المنشأة	الوسيط	درجة الحرارة
تجهيزات هواء الغرفة	الهواء	16 – 26
عمليات التبريد	الهواء	20 – 60
منشآت التبريد وعمليات أخرى	ماء	20 – 60
منشآت محركات الاحتراق وهندسة العمليات	غازات الاحتراق	150 – 550

لاسترجاع الحرارة تستخدم المبادلات الحرارية الاسترجاعية الشكل (2.13)، ولتوليد الكهرباء تستخدم عملية ORC (Organic rankine Cycle) أي دورة رانكين العضوية ذات الوسيط العضوي (مثل R 11 وR 12 ...) ويمكن الحصول عن طريق عمليات ORC عندما تكون درجات حرارة الغازات الضائعة 200 إلى 500 °C على مردود يصل إلى 20 %.

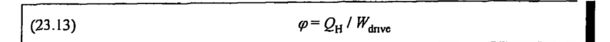
لتحويل الحرارة الضائعة إلى حرارة مفيدة تستخدم أيضاً المضخات الحرارية. تنقل المضخة الحرارية الحرارة من وسيط منبع حراري ذي درجة حرارة منخفضة إلى وسيط عمل عند مستوى حراري أعلى، وهي تتألف من مبادل حراري لسحب الحرارة من المصدر الحراري (حرارة الوسط الخارجي أو حرارة ضائعة) وآلة التبريد ومبادل حراري لانتقال الحرارة إلى وسيط عمل العملية

المفيدة، مثلاً إلى الماء الساخن. تتألف آلة التبريد بالانضغاط من أربعة عناصر: مبخر وضاغط ومكثف وصمام خنق الشكل (3.13). ويستخدم كوسيط تبريد مائع ذو درجة غليان منخفضة وغير حاو على FCKW كالأمونياك. تستخدم لتشغيل الضاغط محركات كهربائية أو محركات احتراق داخلي.

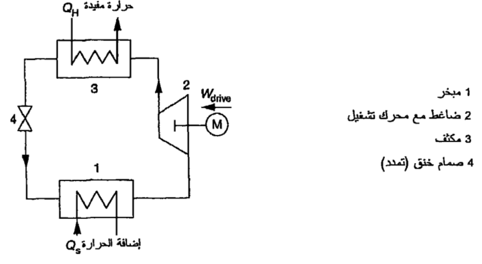


الشكل 2.13 : استرجاع حرارة الغازات (a) لتوليد حرارة مفيدة (b) لتوليد التيار الكهربائي.

رقم الاستطاعة أو رقم التسخين لمضخة حرارية هو النسبة بين حرارة التسخين وطاقة التحريك الميكانيكية.



$$\varphi = Q_H / W_{drive} \qquad (23.13)$$



الشكل 3.13 : المضخة الحرارية بالانضغاط.

تتراوح قيمة φ للمضخات الحرارية الكهربائية بين 2.0 و4.3. وللمضخات الحرارية ذات محرك الاحتراق الداخلي يصل رقم التسخين السنوي 1.1 إلى 2.4. تتراوح الحدود العليا لدرجة حرارة تكاثف وسائط التبريد المختلفة بين 55 و 120 °C. يرتبط فرق درجات الحرارة المرتفع بين المصدر الحراري والماء الساخن بالاستفادة الكبيرة من الطاقة مما يؤدي إلى قيم منخفضة نسبياً لـِ φ.

أما المضخة الحرارية الامتصاصية فتتألف من: مبخر وقميص ومولد ومكثف ومضخة وصمامي خنق (تمدد) (الشكل 4.13).

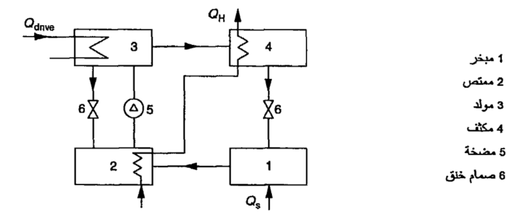
تعمل المضخات الحرارية الامتصاصية بزوج من وسائط العمل (بروميد الليثيوم ـــ الماء للمبخرات التي تزيد حرارتها عن 4 °C أو الامونياك ـــ الماء للمبخرات التي تقل درجة حرارتها عن الصفر 0 °C).

نسبة الحرارة لمضخة حرارية امتصاصية هي النسبة بين حرارة التسخين وحرارة التحريك (التشغيل):

$$\zeta = Q_H / Q_{drive} \qquad (24.13)$$

وبناءً على فرق درجات الحرارة بين المولد والمبخر فإن قيم ζ التي يمكن الحصول عليها هي 1.1 و1.3.

يمكن تشغيل منشآت التدفئة ذات المضخات الحرارية إما منفردة أو بالمشاركة مع منشأة أخرى.



الشكل 4.13 : المضخة الحرارية الامتصاصية.

عند التشغيل بمضخات حرارية منفردة فإنه يتم تغطية الحمولة الحرارية بدون تسخين إضافي، أما في المنشآت التي تعمل بالمشاركة فإن المضخة الحرارية تعمل على التوازي أو كبديل مع منشأة تدفئة

تقليدية، وعند التشغيل بالمشاركة يجب أن يصمم التسخين الإضافي دوماً من أجل 100 % للحرارة الأعظمية اللازمة للتسخين. يمكن للمنشآت التي تعمل بالمشاركة وعلى التوازي أن تغطي الاحتياجات الحرارية بشكل أكبر وذلك بمساعدة المضخة الحرارية.

تبلغ تكاليف الاستثمار 500 إلى 700 DM لكل kW من الاستطاعة المفيدة، ومن أجل تشغيل اقتصادي يلزم 5000 إلى 6000 ساعة استخدام في العام.

تستخدم المضخات الحرارية للتدفئة في الغرف ولتوليد الحرارة للعمليات المختلفة. أما مصادر الحرارة لمنشآت المضخات الحرارية فهي: الهواء الخارجي، المياه الجوفية (8 إلى 12 °C)، التراب (الأرض)، المياه السطحية (2 إلى 15 °C)، الإشعاع الشمسي، الهواء المطروح، المياه المطروحة، ماء التبريد.

وفر الطاقة في المنشأة ذات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة والبرودة

إن مزيّة هذه المنشأة هي عملها طوال العام، وبالتالي يرتفع معدل استثمارها واقتصاديتها. في المثال (5.13) ستعرض مقارنة بين المنشأة ذات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة والبرودة وبين منشأة تبريد تقليدية ذات آلة تبريد بالانضغاط.

مثال 5.13

يطلب تحديد درجة الاستفادة لمحطة ذات توليد مشترك للكهرباء وللحرارة وللبرودة بآلة تبريد امتصاصية، ولمحطة أخرى تولد البرودة، بواسطة آلة تبريد بالانضغاط وتولد الكهرباء في منشأة بخارية.

معلوم للمحطة ذات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة والبرودة، القيم الساعية التالية (بالـــ kWh):

الاستهلاك للطاقة الأولية 2560، الطاقة المفيدة (الطاقة الكهربائية 770، الحرارة المفيدة 405 والبرودة المفيدة 1000)، ضياعات الطاقة 358.

أما كميات الطاقة الساعية (بالـــ kWh) في منشأة المقارنة فهي:

في محطة توليد الكهرباء: استهلاك الطاقة الأولية 3170، الطاقة المفيدة (الكهربائية) 770، ضياعات الطاقة 2155.

وفي آلة التبريد بالانضغاط: التبريد المفيد 1000، الطاقة الكهربائية لتشغيل الضاغط 245.

الحل

تحسب درجة الاستفادة التي هي النسبة بين الطاقة المفيدة (تيار كهربائي، حرارة، برودة) والطاقة المستخدمة كما يلي:

ـــ لمحطة التوليد المشترك للكهرباء والبرودة والحرارة:

$$\eta_1 = E_u / E_{prim} = 2175 / 2560 = 0.85$$

ـــ ولمنشأة المقارنة ذات توليد البرودة في آلة التبريد بالانضغاط وتوليد الكهرباء في المحطة البخارية.

$$\eta_2 = Q_u + E_{el} / E_{prim} = 770 + 1000 / 3170 = 0.56$$

5.13 توليد الكهرباء في آلات تمدد الغاز

العملية

يتراوح ضغط الغاز الطبيعي في شبكات توزيع الغاز بين 40 و70 bar، يُخفَّض هذا الضغط إلى 4 حتى 8 bar في محطة تنظيم الضغط بواسطة الخنق.

!	*الخنق هو عملية تمدد كظيم غير عكوس لوسيط عن طريق جريانه عبر صمام تمدد.*

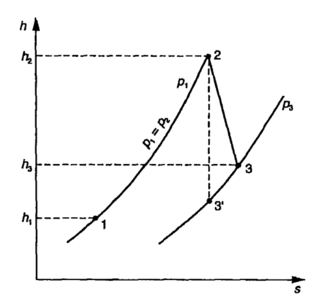
وهكذا ينخفض الضغط ($p_2 < p_1$) مع بقاء إنتالبي وسيط العمل ثابتاً أي $h_1 = h_2$. كذلك تبقى درجة الحرارة في الغازات المثالية ثابتةً $t_1 = t_2$. وجرَّاء أثر تومسون ـــ جول (Thomson-Joule effect) فإن الغاز الطبيعي يتبرّد عند إجراء عملية الخنق أي أن $t_2 < t_1$ عندما تكون درجة حرارته قبل صمام التمدد أصغر من درجة حرارة العكس (الانقلاب) T_{inv}. فمثلاً تبلغ درجة حرارة الانقلاب لبخار الماء 4369 K ولذلك تنخفض درجة حرارته عند الخنق.

عند إجراء عملية الخنق للغاز الطبيعي فإنه يؤخذ عند الحساب انخفاض في درجة الحرارة قدره 0.4 إلى 0.5 K لكل I bar في تغير الضغط Δp. ولتجنب تبريد مبالغ فيه وغير مرغوب عند قيمة مرتفعة لـِ Δp فإنه يتم عادة تسخين الغاز.

إن هبوط ضغط الغاز الطبيعي الذي يحدث في جملة التغذية وعند الخنق يمكن استخدامه في توليد التيار الكهربائي.

لتوليد الكهرباء يُسخَّن الغاز الطبيعي في البدء تسخيناً أولياً ثم يترك ليتمدد في آلة تمدد الغاز (عنفة أو آلة تمدد مكبسية أو لولبية).

من الضروري إجراء التسخين الأولي للغاز لأن درجة حرارته عند التمدد تنخفض.



الشكل 5.13 : التسخين الأولي للغاز بثبوت الضغط (1-2) وتمدد الغاز غير العكوس (2-3) على مخطط h-s.

يبين الشكل (5.13) العملية المؤلفة من تسخين أولي للغاز عند ثبوت الضغط وتمدد الغاز غير العكوس وذلك عل مخطط h-s.

ينتج استهلاك الحرارة اللازم لتسخين الغاز تسخيناً أولياً (1-2 في الشكل 5.13) من المعادلة:

$$Q_s = m\ \Delta h_{preh} = m\ c_p\ (T_2 - T_1) \quad [kJ/s] \qquad (25.13)$$

حيث: m التدفق الكتلي للغاز الطبيعي [kJ/s]

Δh_{preh} ارتفاع الانتالبي [kJ/kg]

c_p السعة الحرارية النوعية الوسطية للغاز الطبيعي [kJ/kg]

T_1 وT_2 درجة حرارة الغاز قبل التسخين الأولي وبعده.

في التمدد النظري (الإيزونتروبي) (2 - '3) فإن العمل النوعي المفيد يحسب كما يلي:

$$w_i = h_2 - h_3' = c_p(T_2 - T_3')$$

$$= k / (k-1)\ R\ T_2\ [1 - (p_3 / p_2)^{(k-1)/k}] \quad [kJ/kg] \qquad (26.13)$$

حيث: $k = 1.32$ (لـ CH_4) أس الإيزنتروبي

R ثابت الغاز (0.519kJ/kgK للميتان)، الدليلان 2 و3 هما حالة الغاز قبل التمدد وبعده.

ولحساب الاستطاعة النظرية لآلة تمدد الغاز:

$$P_{theor} = m\, w_t \quad [kW] \qquad (27.13)$$

حيث: m التدفق الكتلي للغاز [kg/s].

بسبب عدم العكوسية تنشأ ضياعات طاقة يتم تضمينها في المردود الداخلي η_i للآلة.

أما الاستطاعة الفعلية P_a الممكن نلقّيها من آلة التمدد فهي أقل من الاستطاعة النظرية وهي:

$$P_a = \eta_i\, P_{theor} = \eta_i\, m\, w_t \quad [kW] \qquad (28.13)$$

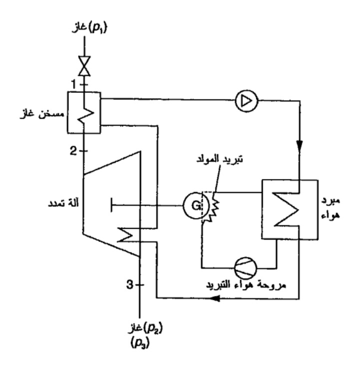
أما درجة الحرارة النهائية الفعلية للغاز فهي تحسب كما يلي:

$$T_3 = T_2\, \{1 - [1 - (p_3 / p_2)^{(k-1)/k}]\, \eta_i\} \quad [K] \qquad (29.13)$$

يتم كسب الاستهلاك الزائد (الإضافي) للتسخين الأولي عند التمدد مقارنة بالاختناق بشكل كامل كعمل.

ومردود العملية المثالية يحسب كما يلي:

$$\eta_{theor} = P_{theor} / Q_s \qquad (30.13)$$



الشكل 6.13 : مخطط سير العمليات في منشأة آلة التمدد المؤلفة من مسخن الغاز، محرك غازي مع آلة تمدد، مولد ومبرد هواء.

المردود الإجمالي الفعلي (يبلغ حوالي 80 % عند استرجاع الحرارة) يحسب كما يلي:

$$\eta_{total} = \eta_{theor}\, \eta_i\, \eta_m\, \eta_G \qquad (31.13)$$

حيث: η_i المردود الداخلي لآلة التمدد

η_m المردود الميكانيكي

η_G مردود المولد الكهربائي.

يبين الشكل (6.13) مخطط سير العمليات في منشأة آلة التمدد، المؤلفة من: آلة تمدد (محرك غازي) ومولد. تُنقَل الحرارة التي تمر على آلة التمدد والمولد ثم تضيع إلى ماء التسخين في مبرد الهواء ومبرد المحرك الغازي، وتُستَخدم في التسخين الأولي للغاز في مسخنٍ للغاز. وكمثالٍ ستُعَرض مواصفات منشأة تمدد الغاز الطبيعي المستخدمة لتزويد مدينة Lübeck (الألمانية) بالغاز. القيم الأولية والنهائية التي تميز الغاز الطبيعي هي على سبيل المثال: 45 حتى 50 bar/ 9 إلى 16 و40 حتى 45 bar/ 4 حتى 7.5bar ...إلخ حتى 17.5 bar/ 4 حتى 8 bar.تعلق الاستطاعة الكهربائية P_{el} بهبوط الضغط وتدفـــق الغاز V: عند $V = 45000\ m^3/h$ فإن $P_{el} = 1.5MW$ وعند 7000 m^3/h تكون 0.365 MW. ويتم التشغيل الفعال بمعدّل 4000 ساعة حمولة كاملة في العام.

كذلك يمكن استخدام العنفات الغازية في عملية تمدد الغاز الطبيعي.

14 الهيدروجين، خلايا الوقود، مولدات MHD مفاعل الاندماج النووي

1.14 إنتاج الهيدروجين واستخدامه كطاقة

طرائق الإنتاج السائدة

يتم في الوقت الحاضر توليد الهيدروجين من الغاز الطبيعي والنفط (نفتا) والفحم. يتولد عن طريق التحويل بواسطة البخار (عند الدرجة 900 °C) لأنواع الوقود الطيارة مثل الغاز الطبيعي، والنفتا* (naphta) أو عن طريق الأكسدة الجزئية للفحم (تحويله إلى غاز بإضافة الأوكسجين وبخار الماء عند درجة الحرارة 1400 °C) يتولد مزيج غازات حاوٍ على الهيدروجين، وينتج من الغاز الطبيعي والنفتا غازٌ تركيبه كما يلي: حوالي 68 % H_2، 10 % CO، 10 % CH_4، 10 % CO_2 و2 إلى 3 % N_2. يتضمن غاز الكربون (الفحم) 30 إلى 40 % H_2 و50 إلـى 55 % CO و1 إلـى 3 % CH_4 و3 إلى 12 % CO_2 و1 إلى 2 % N_2. عن طريق تحويل ثنائي المراحل مُحفَّز وعند درجة حرارة 300 إلى 500 °C أو عند 200 °C يجري تخليص الغاز الخام من CO. وفي عملية غسيل ثانية لاحقة يُفصل CO_2 وينتج بذلك غاز الهيدروجين (الشكل 1.14).

إذا استخدم الغاز الطبيعي أو النفط كوقود فإن العملية توصف كما يلي.

تحويل الفحوم الهيدروجينية للوقود بالبخار:

$$C_m H_n + m H_2O = m CO + (m + n/2) H_2 \quad (1.14)$$

تحويل CO بواسطة البخار:

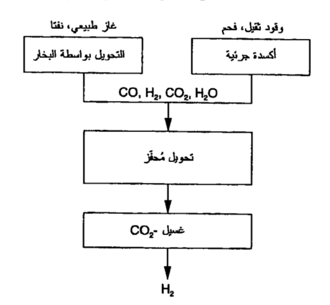
$$CO + H_2O = CO_2 + H_2 \quad (2.14)$$

* المقصود بذلك مزيج بترولي درجة غليانه بين 95 و150 °C (من نواتج الصناعة البتروكيميائية) ـــ المترجم.

وللميتان تنطبق معادلات التحفيز التالية:

$$CH_4 + H_2O = CO + 3H_2 - 205\ kJ/Mol \quad (3.14)$$

$$CH_4 + 2H_2O = CO_2 + 4H_2 - 164\ kJ/Mol \quad (4.14)$$



الشكل 1.14 : توليد الهيدروجين بواسطة التحويل بالبخار للغاز الطبيعي أو للنفتا أو بواسطة تحويل الفحم إلى غاز.

يعادل المحتوى الحراري لغاز الهيدروجين H_2 الناتج 75 حتى 80 % من المحتوى الحراري للغاز الطبيعي و 55 إلى 60 % من المحتوى الحراري للفحم. تختلف تكاليف إنتاج الهيدروجين وفقاً لنوع الوقود ولطريقة الإنتاج. من أجل 1 GJ من المحتوى الحراري تبلغ التكاليف عند استخدام الغاز الطبيعي 23 DM وعند استخدام الفحم البني 24 DM وللفحم الحجري 28 DM. ولإجراء مقارنة يُشار أن سعر الطاقة الكهربائية 20 DM/GJ.

طريقة التحليل الكهربائي

كطريقة بديلة لإنتاج الهيدروجين يمكن استخدام عملية تفكيك الماء بالتحليل الكهربائي والضوئي وبالتحليل الضوئي الحيوي.

عند تفكيك الماء بالتحليل الكهربائي ينتج الهيدروجين مباشرة:

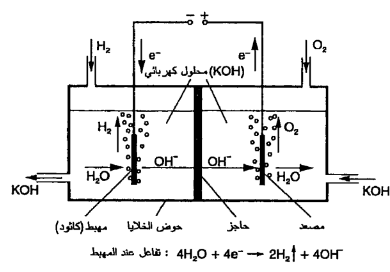
$$H_2O + \text{طاقة} = H_2 + {}^1/{}_2O_2 \quad (5.14)$$

ويبلغ إنتالبي التفاعل ΔH حوالي 3.5 kWh لكل متر مكعب من الهيدروجين.

يبين الشكل (2.14) مبدأ خلية قلوية لتحليل الماء.

يبلغ المردود الذي هو نسبة الاستهلاك النظري إلى الاستهلاك الفعلي حوالي 80 %. ويمكن رفعه إلى 90 % عن طريق إنقاص ضياعات الطاقة.

وهناك الأنواع التالية من المحاليل الكهربائية القلوية والغشائية (ذات الغشاء الرقيق) والبخارية ذات درجة الحرارة المرتفعة.



الشكل 2.14 : مبدأ خلية قلوية لتحليل الماء.

استخدام الهيدروجين لتوليد التيار الكهربائي وإنتاج الحرارة

تستخدم التقانات التالية من أجل الاستفادة من الهيدروجين كوقود:

☐ لتوليد الحرارة:

ـــ عن طريق الإحراق مع الأوكسجين والهواء والحصول على درجات حرارة عالية.

ـــ عن طريق الإحراق المُحفَّز عديم اللهب ذي درجة الحرارة المنخفضة (قليل الإصدار للمواد الضارة).

☐ لتوليد الكهرباء:

ـــ خلايا ذات درجات حرارة عالية وخلايا وقود غشائية (membrane).

ـــ عن طريق ما يسمى التوليد المباشر للبخار.

☐ لتوليد الكهرباء وإنتاج الحرارة معاً

ــ في محطات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة.

ــ في محطات الدارة المركبة ذات العنفات الغازية والبخارية (لتغطية حمولة الذروة).

□ لتخزين الطاقة (في ماءات المعادن) وتخزين H_2 تحت الضغط.

□ لتشغيل المركبات المحافظة على البيئة.

الاحتراق التقليدي والاحتراق المُحفَّز

على العكس من الغاز الطبيعي فإن للهيدروجين كوقود سرعة احتراق عالية ودرجة حرارة مرتفعة للهب. جرَّاء سرعة الاحتراق العالية لـ H_2 (237 cm/s مقابل 42 cm/s للغاز الطبيعي) فإن من الممكن حدوث عدم استقرار عند الاحتراق، كما أن درجات الحرارة المرتفعة للشعلة تؤدي إلى زيادة انبعاثات NO_x.

أما الاحتراق المُحفَّز للهيدروجين فهو يجري عند درجات حرارة أقلّ من 500 °C. ويمكن استخدام الحراقات المحفزة في مجالات الاستطاعة 50 kW للتدفئة والتبريد الامتصاصي، وهي تتمتع بمردود عالٍ وتعمل بدون إطلاق للمواد الضارة. بواسطة التشغيل المشترك للاحتراق بلهب والاحتراق المُحفَّز عند درجات حرارة تتراوح بين 800 و1500 °C يمكن الوصول إلى استطاعات في مجال الــ MW مع تشكل قليل من NO_x.

محطات الدارة المركبة (ذات العنفات الغازية والبخارية) ومحطات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة

لتوليد الكهرباء والحرارة يمكن استخدام محطات الدارة المركبة (عنفات غازية + بخارية) وكذلك محطات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة ذات العنفات الغازية. تتمتع محطات الدارة المركبة (العنفات الغازية + البخارية) التي تحرق الوقود الغازي في الوقت الحاضر مقارنة بمحطات توليد الطاقة الأخرى في مجال الاستطاعة 500 MW بأقل تكاليف استثمار ويتراوح مردودها بين 50 و55 %. ويمكن الوصول إلى تشغيل بفعالية عالية دون تعديلات هندسية جوهرية باستخدام الهيدروجين لمحطات الدارة المركبة.

التوليد المباشر للبخار

تتم تغذية عنفة بخارية ذات ضغط عالٍ ودرجة عالية من مولد بخار H_2 / O_2، وهذه العملية التي هي بديل لعملية البخار – الغاز (عنفة بخارية + عنفة غازية) تؤدي إلى ارتفاع المردود إلى ما يزيد على 50%.

تُطوَّر في الوقت الحاضر طريقة جديدة (HYDROSS) للتوليد المباشر للبخار من الماء والأوكسجين. مبدأ هذه الطريقة بسيط. تساق كميات متكافئة من H_2 وO_2 إلى حجرة احتراق ثم تحرق ويحقن الماء عبر فوهات متعددة إلى حجرة الاحتراق، وقبل ذلك يستخدم هذا الماء في تبريد جدار حجرة الاحتراق. تُبرَّد غازات الاحتراق الساخنة من الدرجة 3000 °C إلى درجة حرارة البخار المطلوبة (500 حتى 1000 °C) ويتوقع أن يصل المردود إلى 50 % عند الحمولة الجزئية وإلى 100 % عند الحمولة الكاملة. يجب تنفيذ هذه الطريقة بحيث تكون بأسعار مناسبة، وتوضع في الوقت الحاضر خطط لمنشآت استطاعتها تتراوح بين 30 و100 MW. ويمكن بزمن إقلاع صغير للغاية استخدام هذه المولدات كمعدات احتياط آنية في محطات توليد الطاقة.

في مجال تقانة الهيدروجين مازالت ثمة حاجة ماسة للتطوير.

2.14 خلايا الوقود

المبدأ

يتم تحويل الطاقة عند استخدام الوقود بالطريقة التقليدية كما يلي:

الطاقة الكيميائية للوقود ← حرارة (احتراق وانتقال الحرارة) ← طاقة ميكانيكية (آلة حرارية) ← طاقة كهربائية (مولد).

تُحوّل خلايا الوقود عن طريق عملية كهركيميائية الطاقة الكيميائية لوقود ما (مثل الهيدروجين أو الغاز الطبيعي) بشكل مباشر إلى طاقة كهربائية، ويولد عندئذ تيار مستمر منخفض التوتر (الجهد).

تجري العملية في خلية الوقود كما يلي:

وقود + وسيط تأكسد ← نواتج أكسدة + عمل مفيد (طاقة كهربائية) + حرارة (6.14)

تتألف خلية الوقود $H_2–O_2$ من قطبين (مصعد ومهبط) ومحلول كهربائي. أما المعادلات التي تجري عند المهبط أو المصعد فهي من أجل خلية وقود تحوي الهيدروجين والأوكسجين كما يلي:

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \quad (7.14)$$

أو

$$2H^+ + 2e^- + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O \text{ (سائل)} \quad (8.14)$$

وهكذا يمكن وصف التفاعل الإجمالي في خلية الوقود $H_2–O_2$ بالمعادلة التالية:

(9.14) H_2 (غاز) + $^1/_2O_2$ (غاز) → H_2O (سائل)

يمكن حساب القوة المحركة الكهربائية النظرية الأعظمية الناتجة عن خلية وقود باستخدام المعادلة التالية:

(10.14) $$E_{rev} = -\Delta G / nF \quad [V]$$

حيث: ΔG تغير الطاقة الحرة في التفاعل [J/Mol]

n عدد الالكترونات التي تشارك بالتفاعل والموجودة في كل مول من الوقود (للهيدروجين n = 2)

F ثابت فارادي (69487 C/Mol).

ولحساب تغير الطاقة الحرة في تفاعل كيميائي:

(11.14) $$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad [J / Mol]$$

حيث: ΔH تغير الإنتالبي للتفاعل الإجمالي

$T\Delta S$ كمية الحرارة الممتصة أثناء عملية عكوسة عند ثبات درجة الحرارة.

يتعلق توتر (جهد) خلية الوقود بدرجة الحرارة والضغط، وتبلغ لخلية الوقود H_2–O_2 عند 1 atm القيمة 1.23 V عند درجة الحرارة 25 °C وعند درجة الحرارة 200 °C تصبح 1.15 V فقط. وبازدياد الضغط يرتفع التوتر (الجهد).

مردود خلية الوقود

يتم الوصول إلى أعظم مردود حراري η_{th} في خلية وقود عكوسة، وتنطبق العلاقة التالية:

(12.14) $$\eta_{th} = \Delta G / \Delta H = 1 - T\Delta S / \Delta H$$

حيث: ΔG تغير الطاقة الحرة ($\Delta G = -237.14$ kJ/Mol)

ΔH تغير الانتالبي ($\Delta H = -285.83$ kJ/Mol) عند تشكل مول من الماء السائل من H_2 و O_2 عند 1 atm و25 °C.

ولحساب العمل الأعظمي لكل مول H_2 (متفاعل) أو لكل مول H_2O (ناتج):

(13.14) $$W_{max} = \Delta G_R - \Delta G_{H_2O} \quad [kJ/Mol]$$

حيث: $\Delta G_R = 0$ kJ / Mol للمتفاعل.

القوة المحركة الكهربائية (electro motoric force) تحسب كما يلي:

$$\text{EMF} = E_{rev} = W_{max} / (n \cdot F) \quad [\text{V}] \qquad (14.14)$$

بمراعاة عامل الجودة η_{Good} يمكن حساب المردود الإجمالي لخلية الوقود كما يلي:

$$\eta_{total} = \eta_{th} \cdot \eta_{Good} \qquad (15.14)$$

ولحساب الاستطاعة العكوسة الممكن كسبها:

$$P_{rev} = \Delta G \cdot m / M_{H_2} \quad [\text{W}] \qquad (16.14)$$

حيث: m التدفق الكتلي للهيدروجين

M_{H_2} الكتلة المولية للهيدروجين (2.016 kg / kMol).

ولحساب الاستطاعة الكهربائية الفعلية لخلية الوقود:

$$P_a = P_{rev} \cdot \eta_{total} \qquad (17.14)$$

أما تيار الحرارة الذي يمكن تصريفه فيحسب كما يلي:

$$Q = P_{rev} - P_a \quad [\text{W}] \qquad (18.14)$$

المحاسن والمساوئ

لخلايا الوقود التي تستخدم الهيدروجين المزايا التالية:

- مردود أعلى (أكبر من 50 %) عند الحمولة الكاملة وكذلك الجزئية.
- الماء هو ناتج التفاعل.
- قلة الضجيج.
- عدم إصدار مواد ضارة.

أما العيب المقابل لهذه المزايا فهو ارتفاع تكاليف الاستثمار وقصر العمر.

تعتبر خلايا الوقود مصدراً مثالياً للتيار الكهربائي ويصل مردودها إلى 40 %، ويمكن رفعه (المردود) إلى 80 % عن طريق استخدام كمية الحرارة الإضافية المنتشرة. يمكن تحقيق وفر في الطاقة قدره 40 إلى 60 % عن طريق استخدام تقانة خلايا الوقود، كما يمكن تخفيض انبعاثات NO_x في محطات توليد الطاقة ووسائل النقل من 50 إلى 90 % وتخفيض إطلاق CO_2 بحدود 50 % وذلك مقارنة بالطرق المألوفة.

مثال 1.14

يُطلب حساب توتر (جهد) العمل على فراغ (بدون حمولة) والعمل الأعظمي والمردود الحراري لخلية وقود تستخدم H_2–O_2 عند درجة الحرارة 25 °C والضغط 1 atm (1.013 bar). الناتج H_2O يتواجد في الحالة السائلة.

ما هي قيمة الاستطاعة العكوسة الممكن كسبها وكذلك الاستطاعة الفعلية والمردود الإجمالي لخلية الوقود إذا كانت قيمة عامل الجودة 0.7 ؟

استهلاك H_2 هو 1.3 kg/ h.

الحل

1. تغير الطاقة الحرة وانتالبي تشكل H_2O (سائل) عند 1 bar و25 °C هما كما يلي:

$$\Delta H_{H_2O} = -285.83 \text{ kJ / Mol}$$

$$\Delta G_{H_2O} = -237.14 \text{ kJ / Mol}$$

وبطريقة مشابهة فمن أجل المتفاعل:

$$\Delta H_R = \Delta G_R = 0 \text{ kJ / Mol}$$

2. العمل الأعظمي لكل مول H_2 (المتفاعل) أو لكل مول H_2O (ناتج):

$$\begin{aligned} W_{max} &= \Delta G_R - \Delta G_{H_2O} \\ &= 0 \text{ kJ / Mol} - (-237.14 \text{ kJ/Mol}) \\ &= 237.14 \text{ kJ/Mol} \end{aligned}$$

3. التوتر (الجهد) الكهربائي النظري يمكن حسابه عن طريق القوة المحركة الكهربائية (EMF):

$$\begin{aligned} EMF = E_{rev} &= W_{max} / (n \cdot F) \\ &= 237.14 \text{ kJ / Mol} /(2 \times 96487 \text{ As/Mol}) \\ &= 1.229 \text{ V} \end{aligned}$$

4. المردود الحراري لخلية الوقود:

$$\begin{aligned} \eta_{th} &= \Delta G_{H_2O} / \Delta H_{H_2O} \\ &= 237.14 \text{ kJ/Mol} / 285.83 \text{ kJ/Mol} = 0.83 \end{aligned}$$

5. المردود الإجمالي لخلية الوقود:

$$\begin{aligned} \eta_{total} &= \eta_{th} \cdot \eta_{Good} \\ &= 0.83 \times 0.7 = 0.58 \end{aligned}$$

6. الاستطاعة العكوسة الممكن كسبها:

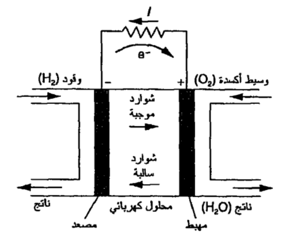
$$P_{rev} = \Delta G \cdot m / M_{H_2O}$$
$$= 237.14 \text{ kJ/Mol} \times 1.3 \text{ kg} / 3600 \text{ s} / 2.016 \text{ kg/Mol}$$
$$= 42.48 \text{ W}$$

7. الاستطاعة الكهربائية الفعلية لخلية الوقود:

$$P_a = P_{rev} \cdot \eta_{total}$$
$$= 42.48 \text{ W} \times 0.58 = 24.64 \text{ W}$$

8. التيار الحراري الذي يتم تصريفه يحسب عن طريق الفرق بين الاستطاعة العكوسة والاستطاعة الفعلية المقدمة:

$$Q = P_{rev} - P_a$$
$$= 42.48 \text{ W} - 24.64 \text{ W} = 17.84 \text{ W}$$



الشكل 3.14 : مبدأ خلايا الوقود.

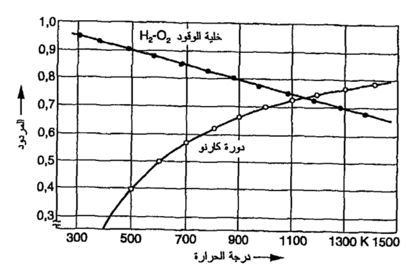
1.2.14 أنواع خلايا الوقود

هناك الأنواع التالية من خلايا الوقود:

- الخلايا القلوية
- الخلايا الفوسفورية (حمض الفوسفور)
- خلايا الكربونات المنصهرة
- خلايا المحلول الكهربائي الصلب

يوضّح الشكل (3.14) المبدأ العام لخلايا الوقود.

كما يبين الشكل (4.14) مقارنة بين المردود المثالي (النظري) لخلية الوقود H_2-O_2 وبين مردود دورة كارنو.



الشكل 4.14 : مردود خلية الوقود مقارنة بمردود دورة كارنو وعلاقة ذلك بدرجة الحرارة.

تتغير درجة الحرارة T_1 للمنبع الساخن في دورة كارنو بين 400 و1400 K ، وتبلغ درجة حرارة الطرف ذي الدرجة المنخفضة $T_2 = 300$ K. درجة حرارة خلية الوقود مساوية لِـ T_1.

الجدول 1.14: مردود أهم نماذج خلايا الوقود.

نوع خلية الوقود	درجة الحرارة [°C]	المردود [%]
خلية وقود قلوية	90 – 60	60
خلية وقود حمض الفوسفور	220 – 160	42 – 37
خلية كربونات مصهورة	650 – 600	60 – 50
خلية أوكسيد السيراميك	1000 – 800	65 – 60

يبين الجدول (1.14) المردود العملي الممكن تحقيقه ودرجات حرارة التشغيل للنماذج المهمة لخلايا الوقود.

تحتاج خلايا الوقود مموِّجاً (inverter) لتحويل التوتر (الجهد) المستمر المتغير المولّد إلى توتر متناوب ثابت.

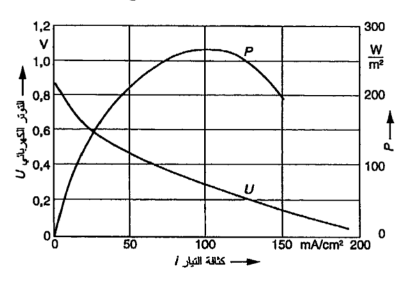
خلايا الوقود الخفيفة

تستخدم هذه الخلايا كمنبع خفيف للتيار وذلك في مجال رحلات الفضاء والمجال العسكري، وبسبب كلفتها العالية جداً فإنها لا تستخدم إلا في هذه المجالات. يولد التيار الكهربائي بمردود يزيد على 60 %، وبما أن درجة حرارة التشغيل منخفضة (80 °C) فإن استخدام الحرارة الضائعة في محاولة لرفع المردود أمرٌ غير ممكن عملياً. تبلغ تكاليف الاستطاعة النوعية لهذه الخلايا في الوقت الحاضر 100 000 DM/kW تقريباً.

خلايا الوقود بحمض الفوسفور

بمقارنتها بخلايا الوقود الخفيفة المتوفرة حالياً فإن خلايا حمض الفوسفور أرخص بشكل كبير، وتعمل هذه الخلايا عند درجة الحرارة 19 °C. وعند استخدامها لتوليد التيار فقط فإن مردودها يفوق 50 %، وباستخدام الحرارة الضائعة فإن من الممكن الوصول إلى مردود إجمالي يبلغ 80 %.

تناسب خلايا حمض الفوسفور باستطاعة عدة كيلوواطات وحتى 10 MW بشكل خاص للاستخدام في المنازل الإفرادية (لأسرة واحدة) أو للمشافي أو للمعامل الصغيرة، كما يمكن استخدامها بشكل منفصل (لا مركزي) لتوليد الكهرباء في موقع معين.



الشكل 5.14 : التوتر (الجهد) الكهربائي والاستطاعة P [W]، بالنسبة لـ m^2 مساحة] لخلية وقود وعلاقتهما بكثافة التيار i [mA/cm²].

تُوجد الآن منشآت استطاعتها في مجال الـ MW وهي قيد التجربة، ويتم في اليابان بناء عدة منشآت وصلت استطاعة الواحدة منها حتى 11 MW. ومن أجل المنشآت التي تقع استطاعتها

بحدود 200 kW فإن التكاليف الاستثمارية لها تبلغ 4500 DM/kWe (عند التشغيل بالغاز الطبيعي)، وهي ما تزال أعلى بثلاثة أضعاف مما هو مطلوب لتكون اقتصادية، ويجب أن تُخفَّض في المستقبل لتصبح بحدود 1300 DM/kW. كذلك يجب إطالة عمرها الحالي الذي يبلغ 15000 ساعة ليصبح 40 000 ساعة.

المنحنى المُميّز

يعطي المنحنى المميز لخلية وقود العلاقة بين التوتر الكهربائي U وكثافة التيار i. يبين الشكل (5.14) المنحني المميز مع منحني الاستطاعة (الاستطاعة بالواط منسوبة إلى الـ m^2 وعلاقتها بكثافة التيار i) لخلية وقود H_2–O_2.

2.2.14 فكرة ومفهوم محطة الطاقة ذات خلايا الوقود

خلايا الوقود ذات درجة الحرارة المرتفعة

تم تطوير هذه الخلايا للاستخدام في محطات الطاقة، وهي تتميز برفقها بالبيئة وبمردودها العالي لتوليد الكهرباء، والذي يصل إلى 65 %. إلاّ أن التحويل المباشر للوقود إلى خلية وقود لا يزال محدوداً لأسباب اقتصادية. لذلك يجب استخدام الحرارة الضائعة وطاقة الارتباط الكيميائية لغازات الاحتراق من أجل رفع مردود محطة الطاقة. يفصل الهيدروجين من غازات الاحتراق بالطريقة الكهركيميائية ويُعاد إلى خلية الوقود. تستخدم الحرارة الضائعة ذات درجة الحرارة المرتفعة لتوليد التيار الكهربائي واستخراج الحرارة.

وهناك نوعان رئيسيان من محطات الطاقة ذات خلايا الوقود:

ـــ خلايا وقود الأكاسيد الصلبة SOFC (SOFC = Solid oxide fud cell).

ـــ خلايا وقود الكربونات المصهورة MCFC (MCFC = Molten carbonate fuel cell).

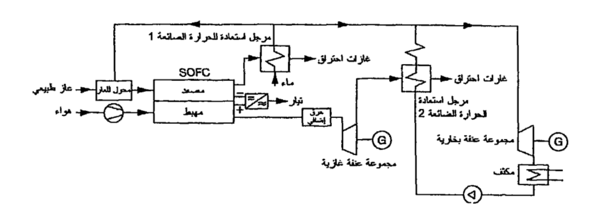
يبين الشكل (6.14) مبدأ وتركيب محطة طاقة ذات دارة مركبة باستخدام خلايا وقود ذات درجات حرارة عالية أجزاؤها الرئيسية:

ـــ منشأة تحويل الغاز الطبيعي.

ـــ خلايا وقود SOFC مع استخدام الحرارة الضائعة.

ـــ عنفة غازية مع المولد مع مرجل استرجاع (استعادة) الحرارة الضائعة.

ـــ عنفة بخارية مع المولد.



الشكل 6.14 : مخطط تركيب محطة ذات دارة مركبة باستعمال خلايا وقود تعمل عند درجة حرارة عالية.

وثمة فكرة أخرى لمحطة للدارة المركبة تستخدم خلايا وقود MCFC، وهذه مناسبة للغاز المستخرج من الفحم لأنها قابلة للتشغيل ليس بالهيدروجين فقط وإنما بالميتان وأول أوكسيد الكربون CO.

يتضمن مشروع محطة الطاقة ذات حجرة الاحتراق وخلايا الوقود MCFC ما يلي:

ــ جهاز تحويل الوقود إلى غاز بدرجات حرارة عالية

ــ مولد البخار ــ مبرد الغاز الخام

ــ سحب الغبار من غاز الفحم وتحضيره

ــ عنفة غازية

ــ خلايا الوقود

ــ الاستفادة من الحرارة الضائعة من المصعد

ــ التسخين الأولي لغاز المصعد / المهبط

ــ الاستفادة من الحرارة الضائعة بقصد التسخين الأولي لمياه التغذية.

إن مزايا مثل هذه المشاريع ــ الأفكار مقارنة بمحطات توليد الطاقة التقليدية هي الانبعاث القليل للمواد الضارة والمردود الأعظمي عند استخدامها لتوليد التيار الكهربائي (يفوق 65%).

ونظراً للتكاليف المرتفعة لتحضير غاز الفحم اللازم لتشغيل خلايا الوقود MCFC، فإن الانبعاثات تقلّ بشكل كبير.

لا تزال مشاريع محطات الطاقة التي تستخدم خلايا الوقود عند درجات الحرارة المرتفعة (MCFC وSOFC) في مرحلتها المبكرة، ويعين استخدامها التجاري التكاليف التي لا تزال عالية

جداً. إلا أن فعاليتها العالية وانخفاض إصدارها للمواد الضارة تبرران تكاليف 1500 دولار لكل 1 kW. إذا أنشئت مشاريع استطاعتها الإجمالية 200 إلى 300 MW في العام فإنه يمكن تحقيق هذه الأسعار. تخطط اليابان حتى عام 2000* لبدء تشغيل محطات طاقة ذات خلايا وقــود استطاعتها 2 GW وتبدو محطات الطاقة ذات خلايا الوقود في المستقبل منافساً لمحطات الطاقة التقليدية.

3.14 تحويل الطاقة الحراري ـ الكهربائي

تأثير Seebeck

في عام 1922 اكتشف Seebeck التأثير الحراري ـــ الكهربائي (سنشير إليه بالكهرحراري)، الذي يُمكّن من التحويل المباشر للحرارة إلى تيار كهربائي. ينشأ في دورة مؤلفة من ناقلين A وB من معدنين مختلفين فرق كمون بين نقاط التماس ذات درجات الحرارة المختلفة. تدعى هذه الدارة الكهربائية بـــ "العنصر الحراري" (thermo element).

يدعى الناقل الذي تجري فيه حوامل الشحنة الســـالبة النوع n (n - Type)، والناقل الثاني ذو حوامـــل الشـــحنات الموجبة، هو مـــن النوع p (p - Type). تدعى نقاط التلامس بالوصلة الساخنة والوصلة الباردة. المعادن المستخدمة للنوع nهناك أسلاك النحاس وللنوع p أسلاك خليطة النيكل مع النحاس. أحد أكثر المواد فعالية للعناصر الحرارية هناك $Bi_2\ Te_3$ الذي يمكن استخدامه بالاستعانة بتقانة معينة كناقل موجب وسالب.

يتعلق ارتفاع فرق التوتر (الجهد) في عنصر حراري بزوج المواد الناقلة وبفرق درجات الحرارة بين نقاط التلامس. فعلى سبيل المثال يبلغ عامل Seebeck الذي نرمز إليه بـــ α لعنصر حراري يتألف من النحاس وخليطة النحاس مع النيكل 0.04 mV/K. عندما تكون درجة الحرارة في عنصر حراري 600 K ينشأ توتر كهربائي قيمته 24 mV، وهذا يعني أنه للحصول على فرق توتر أعلى يجب وصل عدة عناصر حرارية على التوازي.

المولد الكهرحراري

يمكن توليد تيار عن طريق مولد كهرحراري ومجمع شمسي من الطاقة الشمسية. يبين الشكل (7.14) مبدأ عمل المولد الكهرحراري. تبلغ الاستطاعة المفيدة لمولد كهرحراري:

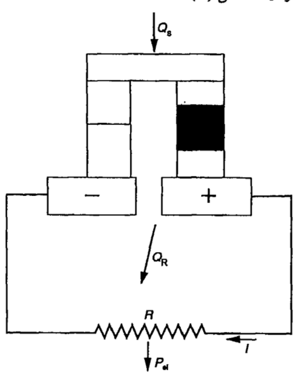
---

* عند تأليف الكتاب في عام 1997 ـــ المترجم

(19.14) $$p_{el} = I^2 R \quad [W]$$

حيث: I التيار

R المقاومة الخارجية للحمل (Ω).



الشكل 7.14 : مبدأ عمل المولد الحراري.

ولحساب التيار نكتب:

(20.14) $$I = \alpha \Delta T / (R_i + R) \quad [A]$$

حيث: α عامل Seebeck [V/K]

ΔT فرق درجات الحرارة بين الطرف الساخن والبارد [K]

R_i المقاومة الداخلية [Ω].

لزيادة الاستطاعة المفيدة لمولد كهرحراري يستخدم الوصل التسلسلي والتفرعي، وهذا مبين على الشكل (8.14) في a وb.

المردود

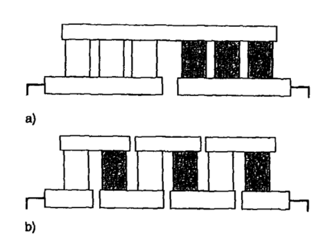
تتحدد جودة (كفاءة) مولد كهرحراري عن طريق المردود الحراري η_{th} الذي ينتج كنسبة بين الاستطاعة الكهربائية P_{el} والاستطاعة الحرارية المستهلكة Q، ويحسب المردود الحراري الأعظمي كما يلي:

$$\eta_{th,max} = (\Delta T / T_H) \sqrt{(1+ZT_m)-1} / [\sqrt{(1+ZT_m)} + T_c / T_H] \qquad (21.14)$$

حيث: T_H، T_c درجة حرارة الطرف الساخن والبارد

T_m درجة الحرارة الوسطية

Z عامل الفعالية $[K^{-1}]$.



الشكل 8.14 : مخططات الوصل لرفع الاستطاعة المفيدة (a) الوصل التسلسلي (b) الوصل التفرعي (على التوازي).

لحساب Z:

$$Z = \alpha^2 / (\sqrt{\rho_N \lambda_N} + \sqrt{\rho_P \lambda_P})^2 \qquad (22.14)$$

حيث: ρ المقاومة النوعية $[\Omega m]$

λ عامل توصيل الحرارة [W/mK]

N و P القطب السالب والقطب الموجب.

يختلف المردود المقابل للاستطاعة الأعظمية $P_{el,max}$ عن $\eta_{th,max}$ ، حيث:

$$\eta_{th} = (\Delta T / \Delta T_H) / [2 + (4 / Z_{opt}\, T_H) - 0.5\, \Delta T / T_H] \qquad (23.14)$$

حيث: Z_{opt} عامل الكفاءة الأمثل.

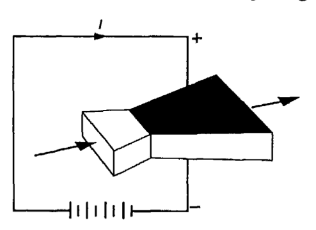
عندما يكون فرق درجات الحرارة بين الطرف الساخن والبارد 400 K (حيث البارد 373 K والساخن 773 K) فإن قيمة η_{th} الأعظمية تبلغ 11.4 %، بينما يصل مردود دورة كارنو $\eta_{th,c}$ إلى 52 % وبالتالي تبلغ جودة المحول الكهرحراري 0.22.

4.14 مولِّد MHD (المولد الهيدروديناميكي المغناطيسي)

المبدأ

مبدأ مولد MHD (Magneto hydrodynamic generator) يقوم على ظاهرة التحريض الكهرطيسي. عندما يتحرك مائع ناقل للكهرباء في حقل مغناطيسي فإنه يتحرض في المائع (الوسيط) توتر (جهد) كهربائي. يتحرك في مولد MHD تيار من الغاز المتأين (بلاسما ذات درجة حرارة منخفضة مؤلفة من إلكترونات وشوارد) ذي السرعة العالية في قناة أفقية عبر حقل مغناطيسي. تتراوح حرارة البلاسما بين 2000 و2500 °C. ولا يمكن الوصول إلى قابلية التوصيل الكهربائي اللازمة للبلاسما إلاّ عن طريق إضافة كميات قليلة من المواد السهلة التأين (مثل السيزيوم، البوتاسيوم).

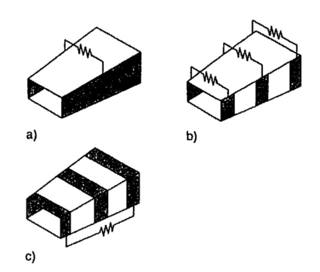
والشكل (9.14) يبيّن مبدأ مولد MHD.



الشكل 9.14 : مبدأ مولد MHD.

يتولد الحقل المغناطيسي بواسطة مغناطيس كهربائي متوضع حول القناة. تمر خطوط الحقل المغناطيسي بشكل عمودي على القناة، والقناة معزولة كهربائياً من الأعلى والأسفل. تقسم الجدران الجانبية للقناة إلى عدة أجزاء منفصلة عن بعضها البعض، حيث تركب هناك أقطاب كهربائية (electrodes). بفعل الحث (التحريض) الكهربائي ـــ المغناطيسي فإنه يتولد توتر كهربائي بالتحريض في الاتجاه المحوري والاتجاه الشاقولي، وتتوجه شوارد وإلكترونات البلاسما إلى الأقطاب الموافقة، وهكذا تُحوَّل الطاقة الحرارية مباشرة إلى طاقة كهربائية.

يبين الشكل (10.14) بشكل تخطيطي توضع الأقطاب الكهربائية في مولد MHD.



الشكل 10.14 : توضع الأقطاب لمحرك MHD، (a) التوضع المتصل (b) أقطاب قطاعية (c) مولد Hall.

في غاز متأين يجري بالسرعة w عبر حقل مغناطيسي B (خطوطه عمودية على اتجاه الجريان)، يتم التحكم باتجاه حوامل الشحنة (الالكترونات والشوارد الموجبة في البلاسما) بحيث تكون عمودية على اتجاه الجريان وينشأ بالتالي حقل كهربائي متحرض.

إذا كان البعد بين الأقطاب s في مولد فارادي عندئذ يحسب التيار الموافق للاستطاعة الأعظمية كما يلي:

$$I_{max} = w \cdot B \cdot A / Q \quad [A] \tag{24.14}$$

حيث: A مساحة سطح الأقطاب [m²]

Q المقاومة النوعية للغاز المتأين [Ω m].

أما التوتر الكهربائي:

$$U_{max} = w \cdot B \cdot s - I_{max} \cdot \rho \cdot s / A \quad [V] \tag{25.14}$$

وتحسب الاستطاعة الأعظمية كما يلي:

$$P_{max} = U_{max} \cdot I_{max} \quad [W] \tag{26.14}$$

المردود (الكفاءة)

يُعَّرف مردود محول الطاقة MHD بأنه النسبة بين الاستطاعة الكهربائية المستجرة والاستطاعة المقدمة واللازمة لدفع تيار الغاز المتأين عبر قناة MHD:

$$\eta_{MHD} = P_R / P_s \tag{27.14}$$

ويحسب مردود مولد MHD بالتالي كما يلي:

$$\eta_{MHD} = U_{max} / (w \cdot B) \quad (28.14)$$

أو بشكل تقريبـــي:

$$\eta_{MHD} = R_a / (R_a + R_i) \quad (29.14)$$

حيث: R_a و R_i المقاومة الخارجية والداخلية للغاز المتأين [Ω].

مثال 2.14

من أجل قناة MHD التي تُشغَّل كمولد فاراداي تبلغ المقاومة النوعية $\rho = 0.08\ \Omega \cdot m$.
لتكن شـــدة الحقل المغناطيسي $B = 3.8$ T (3.8 تسلا)، ومســـاحة سطح الأقطاب الكهربائية A تبلغ 1.2 m^2 . وعند عرض s للقناة يبلغ 0.9 m فإن سرعة البلاسما $w = 950$ m /s.
ما هي الاستطاعة المأخوذة ومردود التحويل؟

الحل

يحسب توتر العمل بدون حمل (على فراغ):

$$U_o = w \cdot B \cdot s$$
$$= 950 \text{ m / s} \times 3.9 \text{ m} = 3249 \text{ V}$$

ويحسب تيار القصر كما يلي:

$$I_k = A \mid w \cdot B \mid / \rho$$
$$= 1.2 \text{ m}^2 \times 950 \text{ m / s} \times 3.8 \text{ T} / 0.08\ \Omega \text{ m} = 54150 \text{ A}$$

وبالتالي فالجهد (التوتر):

$$U_{max} = w \cdot B \cdot s - I_{max}\, \rho \cdot s / A$$
$$= 950 \text{ m /s} \times 3.8 \text{ T} \times 0.9 \text{ m} - 27075 \text{ A} \times 0.08 \text{ W m} \times 0.9 / 1.2 \text{ m}^2$$
$$= 1624.5 \text{ V}$$

والاستطاعة الأعظمية:

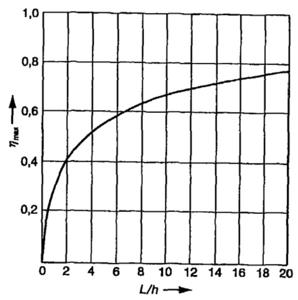
$$P_{max} = U_{max} \cdot I_{max}$$
$$= 1624.5 \text{ V} \times 27075 \text{ A} = 44 \text{ MW}$$

ومن ثم يُحسب مردود التحويل كما يلي:

$$\eta_{MHD} = U_{max} / (w \cdot B)$$
$$= 1624.5 \text{ V} / (950 \text{ m/s} \times 3.8 \text{ T}) = 0.45$$

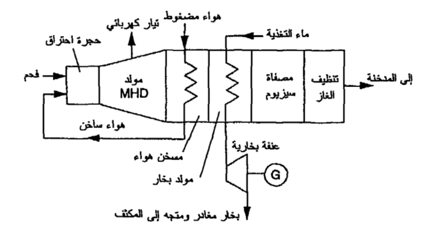
تبين التقديرات بأن التصميم الأمثل لمولد MHD يمكن أن يحقق مردود تحويل للطاقة قيمته الأعظمية تصل إلى 0.5.

يبين الشكل (11.14) المردود الأعظمي لمولد MHD وعلاقته بالنسبة L / h (طول القناة إلى عرضها).



الشكل 11.14 : المولد الأعظمي لمولد MHD وعلاقته بالنسبة L/h (طول القناة على عرضها).

يمكن رفع مردود استخدام الطاقة عن طريق استخدام منشأة مشتركة مؤلفة من مولد MHD مع عنفة غازية أو عنفة بخارية موصولة بعده، ويصل المردود الإجمالي إلى حوالي 60 %.



الشكل 12.14 : مخطط منشأة MHD تحرق الفحم مع عنفة بخارية تالية.

يبين الشكل (12.14) منشأة مشتركة بشكل تخطيطي تتألف من مولد MHD وعنفة بخارية تحرق الفحم.

يُحسب المردود الإجمالي للمنشأة المشتركة ذات مولد MHD كما يلي:

$$\eta_{total} = \eta_{MHD} + \eta_{ST} - \eta_{MHD} \cdot \eta_{ST} \quad (30.14)$$

مثال 3.14

ما هي قيمة المردود الإجمالي لمنشأة مشتركة تتألف من مولد MHD مردوده 0.4 ومنشأة بخارية ذات مردود قيمته 0.38 بدون إحراق إضافي للوقود.

الحل

يحسب المردود الإجمالي من العلاقة:

$$\eta_{total} = \eta_{MHD} + \eta_{ST} - \eta_{MHD} \cdot \eta_{ST}$$
$$= 0.4 + 0.38 - 0.4 \times 0.38 = 0.628$$

هناك أفكار لتركيب منشآت MHD مشتركة، ولتحقيقها يجب حل بعض المشاكل الفنية (مثلاً مسخن الهواء ذو درجة الحرارة المرتفعة).

5.14 الاندماج الحراري النووي المضبوط

المبدأ

يجري داخل الشمس، حيث تسود درجة الحرارة حوالي 40 مليون كلفن، تفاعل اندماج نووي حراري (انصهار) لنوى خفيفة، ويرافق ذلك انطلاق حرارة الارتباط أي حرارة الاندماج وتحولها إلى طاقة حركية لنواتج التفاعل. عند اندماج 4 نوى من الهيدروجين إلى نواة هليوم فإن طاقة الاندماج تصل إلى MeV 28.3 (حيث $1\ MeV = 1.602 \times 10^{-3}\ J$). وتصل هذه الطاقة لكل 1 g من الهيلوم إلى حوالي $6.7 \times 10^{11}\ J$ وهذا يكافئ المحتوى الحراري لـــ 23 طن من الفحم الحجري الذي قيمته الحرارية الدنيا MJ/kg 29.1.

الطريقة

أهم الطرق هناك اندماج الديوتريوم والتريثيوم وكذلك الديوتريوم مع الديوتريوم. الديوتريوم والتريثيوم هما نظيران (isotope) للهيدروجين ^2H أو ^3H، ويمكن استخدامها كوقود في تفاعلات

الاندماج. يتواجد الديوتريوم في الطبيعة على شكل ماء ثقيل فقط في بحار العالم بنسبة 1/6700. التريثيوم عنصر مشعّ ويمكن إنتاجه صناعياً فقط وذلك من نظائر الليثيوم الثقيلة ^{6}Li.

تُعرف نوى الديوتريوم والتريثيوم بالديوتيرون D والتريتون T. يجب أن تملك نوى مزيج والتريتون الديوتريوم مع التريثيوم المتأينة أي للبلاسما طاقة حركية كبيرة من أجل التغلب على قوة التدافع للذرات المشحونة إيجابياً عندما تكون الأبعاد بين الذرات 10^{-15} m، والطاقة الحركية اللازمة لذلك يمكن الوصول إليها عند سرعة للذرات قدرها 1000 km في الثانية.

تجري في مزيج D-T في البلاسما أي في مزيج الإلكترونات ونوى الذرات المشحونة إيجابياً (الشوارد) تفاعلات الاندماج التالية:

$$\text{D (Deutron)} + \text{T (Triton)} \rightarrow \text{He } (\alpha \text{ جسيمات } 3.5\text{ MeV}) + \text{n (Neutron, 14.1 MeV)} \quad (31.14)$$

من أجل إشعال (ignition) وضمان استمرار حدوث الاندماج D-T الحراري النووي في البلاسما والتحكم به فإنه تلزم طاقة حركية قدرها 10 keV (حيث درجة الالتهاب 1.1×10^{8} K) و $1\text{ keV} = 1.14 \times 10^{7}\text{ K}$. يمكن الحصول على درجة الحرارة فائقة الانخفاض هذه بواسطة إضافة شعاع من الجسيمات الحيادية أو التسخين عالي التردد. في اصطدام الاندماج يأتي 10^{5} كولون Coulomb (حيث 1coulomb = 1 A.s). يجب أن تحاط البلاسما بحيز للتفاعل وأن تبقى مادة جدران المفاعل بعيدة عن ذلك. وخلال مراحل بدء التسخين والتطويق تنشأ ضياعات للطاقة بفعل الإشعاع والتوصيل أو عدم نقاء البلاسما بسبب امتزاجها بمادة الجدران.

لا يبقى في البلاسما (أي ضمن حيز التفاعل) إلا طاقة جسيمات α (3.5 MeV) لنويات ^{4}He لأن النيوترونات السريعة تتسرب (14.1 MeV).

وللحصول على توازن الطاقة الإيجابي يجب أن تحصل تفاعلات اندماج كافية في كل واحدة زمن. وبناءً على درجة حرارة T [keV] البلاسما فإنه يجب أن يتحقق معيار Lawson الذي ينص على أن جداء كثافة البلاسما n_i (عدد الجسيمات [1/m³]) بزمن حصر الطاقة t_E [s] هو كما يلي:

$$n_i\, t_E > 2 \times 10^{20}\ \text{s/m}^3 \quad \text{عند} \quad T \geq 10\ \text{keV} \quad (32.14)$$

الإحاطة بالبلاسما (حصر البلاسما) في مفاعل الاندماج

هناك طريقتان للإحاطة بالبلاسما:

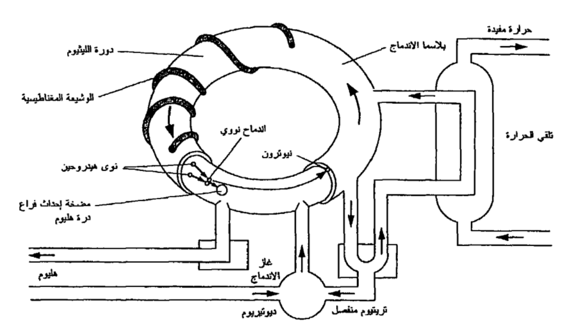
ـــ الإحاطة المغناطيسية

ـ الإحاطة بواسطة العطالة.

يُستخدم في مفاعل الاندماج مع إحاطة البلاسما بالحقل المغناطيسي كما هو الحال في مشروع Tokamak (الشكل 13.14) الحقل المغناطيسي لمغناطيسات كهربائية عالية الشدة لإبقاء البلاسما في وعاء مفرّغ وتحريكها على طول خطوط الحقل المغناطيسي. يُصنع المفاعل بشكل دائري (Torus)، وتتوضع ملفات المغناطيسات الكهربائية حوله، ويقوم المفاعل الدائري بدور الملفات الثانوية للمحولة. وهنا يتحرض تيار يقوم بتسخين البلاسما إلى درجة الحرارة 10^8 K. يُغلّف الحقل المغناطيسي البلاسما ويؤمن لها وقود الاندماج الحراري، ويمنع تلامس البلاسما مع اجزاء المفاعل ومبرده. للوعاء المُفرَّغ غلاف داخلي من الليثيوم (الدثار)، حيث تستولد (تفقس) نيوترونات التريتيوم كما يلي:

$$^{6}Li + n \rightarrow He + T + 4.78\ MeV \qquad (33.14)$$

يلعب الليثيوم الثقيل ^{6}Li دور المادة الحاضنة والمعدّل (المهّدئ).



الشكل 13.14 : مبدأ Tokamak.

يتم حجب إشعاعات غاما والنيوترونات عن طريق طبقة خارجية من الرصاص والماء، كما يخدم الدثار كمصدر حراري لمفاعل Tokamak. تنقل حرارة الاندماج بواسطة ليثيوم ساخن

(1000°C) مع وسيط تبريد (ليثيوم سائل، ماء أو هليوم) إلى مولد البخار لاستخدامها في العملية البخارية.

إن تحقيق موازنة حرارية بخارية إيجابية للاندماج الحراري المضبوط يشترط توفر قيمة عالية لـ $n_i t_E$ (قارن المعادلة 32.14). ومن أجل كثافة نمطية للبلاسما تبلغ $10201/m^3$ في مفاعل Tokamak يجب أن تكون قيمة $t_E = 25$ عند درجة حرارة للبلاسما قدرها 10^8 k. إلا أنه لم يتّم الوصول بعد في منشآت إجراء البحث إلى هذه القيم، وإنما تّم الوصول إلى درجة حرارة التهاب تبلغ حوالي 10^8 k عند الكثافة المطلوبة تقريباً للبلاسما وإلى زمن الحصر 0.1 s، وبالتالي فإن تحقيق الاندماج الحراري المضبوط مع موازنة حرارية موجبة لم يتّم بعد.

في غاز الدويتروم المتأين بشكل كامل يمكن أن تجري تفاعلات الاندماج التالية:

$$D + D \rightarrow He\ (0.8MeV) + n\ (2.5MeV) \quad (34.14)$$

$$D + D \rightarrow T\ (1MeV) + P\ (3MeV) \quad (35.14)$$

وتتطلب هذه التفاعلات حرارة التهاب أعلى بكثير (حوالي 10^9 K) من تفاعل D-T (انظر الجدول) .

الجدول 2.14: درجات الحرارة التصميمية لمفاعل الاندماج المخطط له NETII.

المواصفات	القيم
استطاعة الاندماج الحراري MW	800
نصف قطر البلاسما الكبير/الصغير، m	2.05/6.3
شدة الحقل الحلقي على المحور، T	6
تيار البلاسما، MA	25-30
إجهاد الجدار بالنيوترنات، MW/m^2	0.7

في المفاعل ذي الإحاطة (الحصر) بواسطة العطالة (المقصود إحاطة البلاسما) يتم اللجوء إلى كثافة أعلى للجسيمات تبلغ 10 keV، وهنا لا يلزم حقل مغناطيسي مغلّف. تؤمّن طاقة التسخين عن طريق ليزر ومُطلِق للشوارد. كما تُطلَق كريات زجاج متجمد يبلغ قطرها عدة مليمترات مملوءة بمزيج من D-T عن طريق ليزر كبير جداً مع قطب إشعاع (لفترة $10^{-9}s$) ويجري هذا من كل الجوانب. وهكذا ينشأ في الكريات تركيز الطاقة اللازم لبدء الاندماج النووي. تنضغط البلاسما

المتشكلة بسرعة كبيرة والمسخنة والموجودة في الطبقة الخارجية وتقوم بتأيين خليط D-T داخل الكرة الصغيرة.

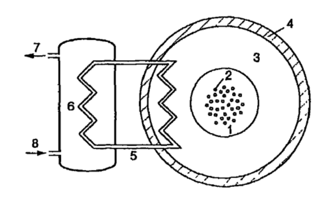
يحدث الاندماج النووي في حجرة مفاعل شكلها حلقي، ويتم نقل الحرارة المنطلقة بواسطة غلاف الليثيوم إلى الماء.

يعيق تطوير هذه الطريقة بالدرجة الأولى عدم توفر الليزر ذي الاستطاعة العالية.

يتم العمل الآن في إطار الاتحاد الأوروبي وضع برنامج بحث استراتيجي NET (Next European Tours) هدفه تطوير مفاعل اندماج، ويبيّن الجدول (2.14) درجة الحرارة التصميمية لمفاعل الاندماج المخطط لبنائه NET II.

وعلى طريق تحقيق هذا المشروع هناك عقبات كبيرة أهمها الاجهاد الشديد للمواد وخاصةً في الأجزاء الداخلية للمفاعل.

يبين الشكل (14.14) مخطط منشأة مستقبلية لتوليد الطاقة مع مفاعل انصهار وعنفات مع مولدات، ومادة التشغيل هي بخار البوتاسيوم أو بخار الماء. ويُؤمّل بأن تصبح طاقة الاندماج النووي في المستقبل نبع الطاقة الذي لا ينضب.



الشكل 14.14 : مبدأ مفاعل اندماجي ذي غلاف مغناطيسي.

الملاحـق

بعض الجداول والأشكال

الجدول A.1 الأجزاء والأضعاف ورموزها

ميكرو	μ =	10^{-6} =	جزء من المليون
ميلي	m =	10^{-3} =	جزء من الألف
كيلو	k =	10^{3} =	ألف ضعف
ميغا	M =	10^{6} =	مليون ضعف
جيغا	G =	10^{9} =	مليار ضعف
تيرا	T =	10^{12} =	بليون ضعف
بيتا	P =	10^{15} =	بليار ضعف
إكسا	E =	10^{18} =	تريليون ضعف

الجدول A.2 واحدات الطاقة والاستطاعة

جول	[J]	للطاقة، العمل، كمية الحرارة
واط	[W]	للاستطاعة، تدفق الطاقة (تيار الطاقة)، التدفق الحراري
1 جول	[J]	= نيوتن متر (Nm) = 1 واط ثانية (Ws)
1 kWh		= KJ 3600
1 BTU		واحدة الحرارة البريطانية = kJ 1.05504

الجدول A.3 عوامل التحويل لواحدات الطاقة

	kJ	Kcal	kWh	*Kg HCE	Kg ROE	m^3 غاز طبيعي
كيلو جول (kJ)	–	0.2388	0.000278	0.000034	0.000024	0.000032
كيلو كالوري (kcal)	4.1868	–	0.001163	0.000143	1.0001	0.00013
كيلو واط ساعي [kWh]	3600	860	–	1.123	0.086	0.113
الواحدة المكافئة لـ 1kg فحم حجري [HCE]	29308	7000	8.14	–	0.7	0.923
الواحدة المكافئة لـ 1kg نفط خام (ROE)	41868	10000	11.63	1.486	–	1.319
1 متر مكعب من الغاز الطبيعي	31736	7580	8.816	1.083	0.758	–
* Hard Coal Equivalent = HCE — المترجم						
Row Oil Equivalen = ROE**						

الجدول A.4 واحدات الضغط ودرجات الحرارة

1 Pa = 1 N/m²,
1 bar = 10^5 Pa = 0,1 MPa = 750 mm Hg = 1,02 · 10^4 mm H_2O

T[K] = t [°C] + 273,15
t [°C] = (t [°F] – 32)/1,8
T[°R] = t [°F] + 459,67
T[K] = 1,8 T[°R]

الشروط النظامية: الدرجة 0 °C والضغط 1.013 bar

الجدول A.5 عوامل الحالة الترموديناميكية للماء وبخار الماء في حالة الإشباع

p	T	v'	v''	h'	h''	Δh_v	s'	s''
bar	°C	dm³/kg	m³/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg · K)	
0,010	6,9808	1,0001	129,20	29,34	2514,4	2485,0	0,1060	8,9767
0,015	13,036	1,0006	87,98	54,71	2525,5	2470,7	0,1957	8,8288
0,020	17,513	1,0012	67,01	73,46	2533,6	2460,2	0,2607	8,7246
0,025	21,096	1,0020	54,26	88,45	2540,2	2451,7	0,3119	8,6440
0,030	24,100	1,0027	45,67	101,00	2545,6	2444,6	0,3544	8,5785
0,035	26,694	1,0033	39,48	111,85	2550,4	2438,5	0,3907	8,5232
0,040	28,983	1,0040	34,80	121,41	2554,5	2433,1	0,4225	8,4755
0,045	31,035	1,0046	31,14	129,99	2558,2	2428,2	0,4507	8,4335
0,050	32,898	1,0052	28,19	137,77	2561,6	2423,8	0,4763	8,3960
0,055	34,605	1,0058	25,77	144,91	2564,7	2419,8	0,4995	8,3621
0,060	36,183	1,0064	23,74	151,50	2567,5	2416,0	0,5209	8,3312
0,065	37,651	1,0069	22,02	157,64	2570,2	2412,5	0,5407	8,3029
0,070	39,025	1,0074	20,53	163,38	2572,6	2409,2	0,5591	8,2767
0,075	40,316	1,0079	19,24	168,77	2574,9	2406,2	0,5763	8,2523
0,080	41,534	1,0084	18,10	173,86	2577,1	2403,2	0,5925	8,2296
0,085	42,689	1,0089	17,10	178,69	2579,2	2400,5	0,6079	8,0872
0,090	43,787	1,0094	16,20	183,28	2581,1	2397,9	0,6224	8,1881
0,095	44,833	1,0098	15,40	187,65	2583,0	2395,3	0,6361	8,1691
0,10	45,833	1,0102	14,67	191,83	2584,8	2392,9	0,6493	8,1511
0,12	49,446	1,0119	12,36	206,94	2591,2	2384,3	0,6963	8,0872
0,14	52,574	1,0133	10,69	220,02	2596,7	2376,7	0,7367	8,0334
0,16	55,341	1,0147	9,433	231,59	2601,6	2370,0	0,7721	7,9869
0,18	57,826	1,0160	8,445	241,99	2605,9	2363,9	0,8036	7,9460
0,20	60,086	1,0172	7,650	251,45	2609,9	2358,4	0,8321	7,9094
0,25	64,992	1,0199	6,204	271,99	2618,3	2346,4	0,8932	7,8323
0,30	69,124	1,0223	5,229	289,30	2625,4	2336,1	0,9441	7,7695
0,40	75,886	1,0265	3,993	317,65	2636,9	2319,2	1,0261	7,6709
0,45	78,743	1,0284	3,576	329,64	2641,7	2312,0	1,0603	7,6307
0,50	81,345	1,0301	3,240	340,56	2646,0	2305,4	1,0912	7,5947
0,55	83,737	1,0317	2,964	350,61	2649,9	2299,3	1,1194	7,5623
0,60	85,954	1,0333	2,732	359,93	2653,6	2293,6	1,1454	7,5327
0,65	88,021	1,0347	2,535	368,62	2656,9	2288,3	1,1696	7,5055
0,70	89,959	1,0361	2,365	376,77	2660,1	2283,3	1,1921	7,4804
0,75	91,785	1,0375	2,217	384,45	2663,0	2278,6	1,2131	7,4570
0,80	93,512	1,0387	2,087	391,72	2665,8	2274,0	1,2330	7,4352
0,85	95,152	1,0400	1,972	398,63	2668,4	2269,8	1,2518	7,4147
0,90	96,713	1,0412	1,869	405,21	2670,9	2265,6	1,2696	7,3954
1,0	99,632	1,0434	1,694	417,51	2675,4	2257,9	1,3027	7,3598
1,5	111,37	1,0530	1,159	467,13	2693,4	2226,2	1,4336	7,2234
2,0	120,23	1,0608	0,8854	504,70	2706,3	2201,6	1,5301	7,1268
2,5	127,43	1,0675	0,7184	535,34	2716,4	2181,0	1,6071	7,0520
3,0	133,54	1,0735	0,6056	561,43	2724,7	2163,2	1,6716	6,9909
3,5	138,87	1,0789	0,5240	584,27	2731,6	2147,4	1,7273	6,9392
4,0	143,62	1,0839	0,4622	604,67	2737,6	2133,0	1,7764	6,8943
4,5	147,92	1,0885	0,4138	623,16	2742,9	2119,7	1,8204	6,8547
5,0	151,84	1,0928	0,3747	640,12	2747,5	2107,4	1,8604	6,8192
6,0	158,84	1,1009	0,3155	670,42	2755,5	2085,0	1,9308	6,7575
7,0	164,96	1,1082	0,2727	697,06	2762,0	2064,9	1,9918	6,7052
8,0	170,41	1,1150	0,2403	720,94	2767,5	2046,5	2,0457	6,6596
9,0	175,36	1,1213	0,2148	742,64	2772,1	2029,5	2,0941	6,6192
10,0	179,88	1,1274	0,1943	762,61	2776,2	2013,6	2,1382	6,5828

تتمة الجدول A.5

p	T	v'	v''	h'	h''	Δh_v	s'	s''
bar	°C	dm³/kg	m³/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg · K)	
11	184,07	1,1331	0,1774	781,13	2779,7	1998,5	2,1786	6,5497
12	187,96	1,1386	0,1632	798,43	2782,7	1984,3	2,2161	6,5194
13	191,61	1,1438	0,1511	814,70	2785,4	1970,7	2,2510	6,4913
14	195,04	1,1489	0,1407	830,08	2787,8	1957,7	2,2837	6,4651
15	198,29	1,1539	0,1317	844,67	2789,9	1945,2	2,3145	6,4406
16	201,37	1,1586	0,1237	858,56	2791,7	1933,2	2,3436	6,4175
17	204,31	1,1633	0,1166	871,84	2793,4	1921,5	2,3713	6,3957
18	207,11	1,1678	0,1103	884,58	2794,8	1910,3	2,3976	6,3751
19	209,80	1,1723	0,1047	896,81	2796,1	1899,3	2,4228	6,3554
20	212,37	1,1766	0,09954	908,59	2797,2	1888,6	2,4469	6,3367
21	214,85	1,1809	0,09489	919,96	2798,2	1878,2	2,4700	6,3187
22	217,24	1,1850	0,09065	930,95	2799,1	1868,1	2,4922	6,3015
23	219,55	1,1892	0,08677	941,60	2799,8	1858,2	2,5136	6,2849
24	221,78	1,1932	0,08320	951,93	2800,4	1848,5	2,5343	6,2690
25	223,94	1,1972	0,07991	961,96	2800,9	1839,0	2,5543	6,2536
26	226,04	1,2011	0,07686	971,72	2801,4	1829,6	2,5736	6,2387
28	230,05	1,2088	0,07139	990,48	2802,0	1811,5	2,6106	6,2104
30	233,84	1,2163	0,06663	1008,4	2802,3	1793,9	2,6455	6,1837
32	237,45	1,2237	0,06244	1025,4	2802,3	1776,9	2,6786	6,1585
34	240,88	1,2310	0,05873	1041,8	2802,1	1760,3	2,7101	6,1344
36	244,16	1,2381	0,05541	1057,6	2801,7	1744,2	2,7401	6,1115
38	247,31	1,2451	0,05244	1072,7	2801,1	1728,4	2,7689	6,0896
40	250,33	1,2521	0,04975	1087,4	2800,3	1712,9	2,7965	6,0685
45	257,41	1,2691	0,04404	1122,1	2797,7	1675,6	2,8612	6,0191
50	263,91	1,2858	0,03943	1154,5	2794,2	1639,7	2,9206	5,9735
55	269,93	1,3023	0,03563	1184,9	2789,9	1605,0	2,9757	5,9309
60	275,55	1,3187	0,03244	1213,7	2785,0	1571,3	3,0273	5,8908
65	280,82	1,3350	0,02972	1241,1	2779,5	1538,4	3,0759	5,8527
70	285,79	1,3513	0,02737	1267,4	2773,5	1506,0	3,1219	5,8162
75	290,50	1,3677	0,02533	1292,7	2766,9	1474,2	3,1657	5,7811
80	294,97	1,3842	0,02353	1317,1	2759,9	1442,8	3,2076	5,7471
85	299,23	1,4009	0,02193	1340,7	2752,5	1411,7	3,2479	5,7141
90	303,31	1,4179	0,02050	1363,7	2744,6	1380,9	3,2867	5,6820
95	307,21	1,4351	0,01921	1386,1	2736,4	1350,2	3,3242	5,6506
100	310,96	1,4526	0,01804	1408,0	2727,7	1319,7	3,3605	5,6198
110	318,05	1,4887	0,01601	1450,6	2709,3	1258,7	3,4304	5,5595
120	324,65	1,5268	0,01428	1491,8	2689,2	1197,4	3,4972	5,5002
130	330,83	1,5672	0,01280	1532,0	2667,0	1135,0	3,5616	5,4408
140	336,64	1,6106	0,01150	1571,6	2642,4	1070,7	3,6242	5,3803
150	342,13	1,6579	0,01034	1611,0	2615,0	1004,0	3,6859	5,3178
160	347,33	1,7103	0,009308	1650,5	2584,9	934,3	3,7471	5,2531
170	352,26	1,7696	0,008371	1691,7	2551,6	859,9	3,8107	5,1855
180	356,96	1,8399	0,007498	1734,8	2513,9	779,1	3,8765	5,1128
190	361,43	1,9260	0,006678	1778,7	2470,6	692,0	3,9429	5,0332
200	365,70	2,0370	0,005877	1826,5	2418,4	591,9	4,0149	4,9412
210	369,78	2,2015	0,005023	1886,3	2347,6	461,3	4,1048	4,8223
220	373,69	2,6714	0,003728	2011,1	2195,6	184,5	4,2947	4,5799
221,2	374,15	3,17	0,00317		2107,4	0		4,4429

الجدول A.6 عوامل الحالة للماء في حالة الغليان ولبخار الماء المشبع؛ قائمة درجات الحرارة (kJ, bar)

درجة الحرارة	الضغط	الحجم النوعي		الكتلة النوعية	الانثالبي النوعي		حرارة التبخر	الانتروبي النوعي	
t °C	p bar	v' m³/kg	v'' m³/kg	ϱ'' m³/kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	r kJ/kg	s' kJ/kg K	s'' kJ/kg K
0,00	0,006108	0,0010002	206,3	0,004847	−0,04	2501,6	2501,6	−0,0002	9,1577
5	0,008718	0,0010000	147,2	0,006795	21,01	2510,7	2489,7	0,0762	9,0269
10	0,012270	0,0010003	106,4	0,009396	41,99	2519,9	2477,9	0,1510	8,9020
15	0,017039	0,0010008	77,98	0,01282	62,94	2529,1	2466,1	0,2243	8,7826
20	0,02337	0,0010017	57,84	0,01729	83,86	2538,2	2454,3	0,2963	8,6684
25	0,03166	0,0010029	43,40	0,02304	104,77	2547,3	2442,5	0,3670	8,5592
30	0,04241	0,0010043	32,93	0,03037	125,66	2556,4	2430,7	0,4365	8,4546
35	0,05622	0,0010060	25,24	0,03961	146,56	2565,4	2418,8	0,5049	8,3543
40	0,07375	0,0010078	19,55	0,05116	167,45	2574,4	2406,9	0,5721	8,2583
45	0,09582	0,0010099	15,28	0,06546	188,35	2583,3	2394,9	0,6383	8,1661
50	0,12335	0,0010121	12,05	0,08302	209,26	2592,2	2382,9	0,7035	8,0776
55	0,15741	0,0010145	9,579	0,1044	230,17	2601,0	2370,8	0,7677	7,9926
60	0,19920	0,0010171	7,679	0,1302	251,09	2609,7	2358,6	0,8310	7,9108
65	0,2501	0,0010199	6,202	0,1612	272,02	2618,4	2346,3	0,8933	7,8322
70	0,3116	0,0010228	5,046	0,1982	292,97	2626,9	2334,0	0,9548	7,7565
75	0,3855	0,0010259	4,134	0,2419	313,94	2635,4	2321,5	1,0154	7,6835
80	0,4736	0,0010292	3,409	0,2933	334,92	2643,8	2308,8	1,0753	7,6132
85	0,5780	0,0010326	2,829	0,3535	355,92	2652,5	2296,5	1,1343	7,5454
90	0,7011	0,0010361	2,361	0,4235	376,94	2660,1	2283,2	1,1925	7,4799
95	0,8453	0,0010399	1,982	0,5045	397,99	2668,1	2270,2	1,2501	7,4166
100	1,0133	0,0010437	1,673	0,5977	419,06	2676,0	2256,9	1,3069	7,3554
105	1,2080	0,0010477	1,419	0,7046	440,17	2683,7	2243,6	1,3630	7,2962
110	1,4327	0,0010519	1,210	0,8265	461,32	2691,3	2230,0	1,4185	7,2388
115	1,6906	0,0010562	1,036	0,9650	482,50	2698,7	2216,2	1,4733	7,1832
120	1,9854	0,0010606	0,8915	1,122	503,72	2706,0	2202,2	1,5276	7,1293
125	2,3210	0,0010652	0,7702	1,298	524,99	2713,0	2188,0	1,5813	7,0769
130	2,7013	0,0010700	0,6681	1,497	546,31	2719,9	2173,6	1,6344	7,0261
135	3,131	0,0010750	0,5818	1,719	567,68	2726,6	2158,9	1,6869	6,9766
140	3,614	0,0010801	0,5085	1,967	589,10	2733,1	2144,0	1,7390	6,9284
145	4,155	0,0010853	0,4460	2,242	610,60	2739,3	2128,7	1,7906	6,8815
150	4,760	0,0010908	0,3924	2,548	632,15	2745,4	2113,2	1,8416	6,8358
155	5,433	0,0010964	0,3464	2,886	653,78	2751,2	2097,4	1,8923	6,9711
160	6,181	0,0011022	0,3068	3,260	675,47	2756,7	2081,3	1,9425	6,7475
165	7,008	0,0011082	0,2724	3,671	697,25	2762,0	2064,8	1,9923	6,7048
170	7,920	0,0011145	0,2426	4,123	719,12	2767,1	2047,9	2,0416	6,6630
175	8,924	0,0011209	0,2165	4,618	741,07	2771,8	2030,7	2,0906	6,6221
180	10,027	0,0011275	0,1938	5,160	763,12	2776,3	2013,1	2,1393	6,5819
185	11,233	0,0011344	0,1739	5,752	785,26	2780,4	1995,2	2,1876	6,5424
190	12,551	0,0011415	0,1563	6,397	807,52	2784,3	1976,7	2,2356	6,5036
195	13,987	0,0011489	0,1408	7,100	829,88	2787,8	1957,9	2,2833	6,4654

تتمة الجدول A.6

درجة الحرارة	الضغط	الحجم النوعي		الكتلة النوعية	الانثالبي النوعي		حرارة التبخر	الانتروبي النوعي	
t °C	p bar	v' m^3/kg	v'' m^3/kg	ϱ'' m^3/kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	r kJ/kg	s' kJ/kg K	s'' kJ/kg K
200	15,549	0,0011565	0,1272	7,864	852,37	2790,9	1938,6	2,3307	6,4278
205	17,243	0,0011644	0,1150	8,694	874,99	2793,8	1918,8	2,3778	6,3906
210	19,077	0,0011726	0,1042	9,593	897,74	2796,2	1898,5	2,4247	6,3539
215	21,060	0,0011811	0,09463	10,57	920,63	2798,3	1877,6	2,4713	6,3176
220	23,198	0,0011900	0,08604	11,62	943,67	2799,9	1856,2	2,5178	6,2817
225	25,501	0,0011992	0,07835	12,76	966,89	2801,2	1834,3	2,5641	6,2461
230	27,976	0,0012087	0,07145	14,00	990,26	2802,0	1811,7	2,6102	6,2107
235	30,632	0,0012187	0,06525	15,33	1013,8	2802,3	1788,5	2,6562	6,1756
240	33,478	0,0012291	0,05965	16,76	1037,2	2802,2	1764,6	2,7020	6,1406
245	36,523	0,0012399	0,05461	18,31	1061,6	2801,6	1740,0	2,7478	6,1057
250	39,776	0,0012513	0,05004	19,99	1085,8	2800,4	1714,6	2,7935	6,0708
255	43,246	0,0012632	0,04590	21,79	1110,2	2798,7	1688,5	2,8392	6,0359
260	46,943	0,0012756	0,04213	23,73	1134,9	2796,4	1661,5	2,8848	6,0010
265	50,877	0,0012887	0,03871	25,83	1159,9	2793,5	1633,6	2,9306	5,9658
270	55,058	0,0013025	0,03559	28,10	1185,2	2789,9	1604,6	2,9763	5,9304
275	59,496	0,0013170	0,03274	30,55	1210,9	2785,5	1574,7	3,0223	5,8947
280	64,202	0,0013324	0,03013	33,19	1236,8	2780,4	1543,6	3,0683	5,8586
285	69,186	0,0013487	0,02773	36,06	1263,2	2774,5	1511,3	3,1146	5,8220
290	74,461	0,0013659	0,02554	39,16	1290,0	2767,6	1477,6	3,1611	5,7848
295	80,037	0,0013844	0,02351	42,53	1317,3	2759,8	1442,6	3,2079	5,7469
300	85,927	0,0014041	0,02165	46,19	1345,0	2751,0	1406,0	3,2552	5,7081
305	92,144	0,0014252	0,01993	50,18	1373,4	2741,1	1367,7	3,3029	5,6685
310	98,700	0,0014480	0,01833	54,54	1402,4	2730,0	1327,6	3,3512	5,6278
315	105,61	0,0014726	0,01686	59,33	1432,1	2717,6	1285,5	3,4002	5,5858
320	112,89	0,0014995	0,01548	64,60	1462,6	2703,7	1241,1	3,4500	5,5423
325	120,56	0,0015289	0,01419	70,45	1494,0	2688,0	1194,0	3,5008	5,4969
330	128,63	0,0015615	0,01299	76,99	1526,5	2670,2	1143,6	3,5528	5,4490
335	137,12	0,0015978	0,01185	84,36	1560,3	2649,7	1089,5	3,6063	5,3979
340	146,05	0,0016387	0,01078	92,76	1595,5	2626,2	1030,7	3,6616	5,3427
345	155,45	0,0016858	0,009763	102,4	1632,5	2598,9	966,4	3,7193	5,2828
350	165,35	0,0017411	0,008799	113,6	1671,9	2567,7	895,7	3,7800	5,2177
355	175,77	0,0018085	0,007859	127,2	1716,6	2530,4	813,8	3,8489	5,1442
360	186,75	0,0018959	0,006940	144,1	1764,2	2485,4	721,3	3,9210	5,0600
365	198,33	0,0020160	0,006012	166,3	1818,0	2428,0	610,0	4,0021	4,9579
370	210,54	0,0022136	0,004973	291,1	1890,2	2342,8	452,6	4,1108	4,8144
374,15	221,20	0,00317	0,00317	315,5	2107,4		0,0	4,4429	

الجدول **A.7** الانتالبي النوعي [kg/kg/K] للماء والبخار الحار

الضغط [bar]	200	250	300	350	400	درجة الحرارة [°C] 450	500	550	600	700	800
1	2875,4	2974,5	3074,5	3175,6	3278,2	3382,4	3488,1	3595,8	3704,8	3928,2	4158,3
5	2855,1	2961,1	3064,8	3168,1	3272,1	3377,2	3483,8	3591,8	3701,5	3925,8	4156,4
10	2826,8	2943,0	3052,1	3158,5	3264,4	3370,8	3478,3	3587,1	3697,4	3922,7	4154,1
15	2791,3	292,15	3037,6	3147,7	3255,8	3363,7	3472,2	3582,4	3693,3	3919,6	4151,7
20	852,6	2902,4	3025,0	3138,6	3248,7	3357,8	3467,3	3577,6	3689,2	3916,5	4149,4
25	852,8	2879,5	3010,4	3128,2	3240,7	3461,7	3461,7	3572,9	3685,1	3913,4	4147,0
30	853,0	2854,8	2995,1	3117,5	3232,5	3444,6	3456,2	3568,1	3681,0	3910,3	4144,7
35	853,2	2828,1	2979,0	3106,5	3224,2	3338,0	3450,6	3563,4	3676,9	3907,2	4142,4
40	853,4	1085,8	2962,0	3095,1	3215,7	3331,2	3445,0	3558,6	3672,8	3904,1	4140,0
45	853,6	1085,8	2944,2	3083,3	3207,1	3324,4	3439,3	3553,8	3668,6	3901,0	4137,7
50	853,8	1085,8	2925,5	3071,2	3198,3	3317,5	3433,7	3549,0	3664,5	3897,9	4135,3
60	854,2	1085,8	2885,0	3045,8	3180,1	3303,5	3422,2	3539,3	3656,2	3891,7	4130,7
70	854,6	1085,8	2839,4	3018,7	3161,2	3289,1	3410,6	3529,6	3647,9	3885,4	4126,0
80	855,1	1085,8	2786,8	2989,9	3141,6	3274,3	3398,8	3519,7	3639,5	3879,2	4121,3
90	855,5	1085,8	1344,5	2959,0	3121,2	3259,2	3386,8	3509,8	3631,1	3873,0	4116,7
100	855,9	1085,8	1343,4	2925,8	3099,9	3243,6	3374,6	3499,8	3622,7	3866,8	4112,0
120	856,8	1085,9	1341,2	2849,7	3054,8	3211,4	3349,6	3479,6	3605,7	3854,3	4102,7
140	857,7	1086,1	1339,2	2754,2	3005,6	3177,4	3323,8	3458,8	3588,5	3841,7	4093,3
160	858,6	1086,3	1337,4	2620,8	2951,3	3141,6	3297,1	3437,7	3571,0	3829,1	4084,0
180	859,5	1086,5	1335,7	1659,8	2890,3	3104,0	3269,6	3416,1	3553,4	3816,5	4074,6
200	860,4	1086,7	1334,3	1647,2	2820,5	3064,3	3241,1	3394,1	3535,5	3803,8	4065,3
250	862,8	1087,5	1331,1	1625,1	2582,0	2954,3	3165,9	3337,0	3489,9	3771,9	4041,9
300	865,2	1088,4	1328,7	1610,0	2161,8	2825,6	3085,0	3277,4	3443,0	3739,7	4018,5
350	867,7	1089,5	1326,8	1598,7	1993,1	2676,4	2998,3	3215,4	3395,1	3707,3	3995,1
400	870,2	1090,8	1325,4	1589,7	1934,1	2515,6	2906,8	3151,6	3346,4	3674,8	3971,7
500	875,4	1093,6	1323,7	1576,4	1877,7	2293,2	2723,0	3021,1	3248,3	3610,2	3925,3
600	880,8	1096,9	1323,2	1567,1	1847,3	2187,1	2570,6	2896,2	3151,6	3547,0	3879,6
800	891,9	1104,4	1324,7	1555,9	1814,2	2094,1	2397,4	2708,0	2980,3	3428,7	3792,8

الجدول A.8 الانتالبي النوعي للماء في مجال ما دون الغليان [kJ/kg]

درجة الحرارة °C	الضغط بالبار [bar] 2	5	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	400
100	419,1	419,4	419,7	420,5	422,0	423,5	425,0	426,5	428,0	429,5	431,0	432,5	434,0	435,6	437,1	438,6	440,1	441,6	449,2
120	503,7	503,9	504,3	505,0	506,4	507,8	509,2	510,6	512,1	513,5	514,9	516,3	517,7	519,2	520,6	522,0	523,5	524,9	532,1
140		589,2	589,5	590,2	591,5	592,8	594,1	595,4	596,7	598,0	599,4	600,7	602,0	603,4	604,7	606,0	607,4	608,7	615,5
160			675,7	676,3	677,5	678,6	679,8	681,0	682,2	683,4	684,6	685,9	687,1	688,2	689,5	690,8	692,0	693,3	699,6
180				763,6	764,6	765,1	766,7	767,8	768,8	769,9	771,0	772,0	773,1	774,2	775,3	776,4	777,6	778,7	784,4
200				852,6	853,4	854,2	855,1	855,9	856,8	858,6	858,6	859,5	860,4	861,4	862,3	863,3	864,2	865,2	870,2
220					944,1	944,7	945,3	945,9	946,6	947,2	947,9	948,6	949,3	950,0	950,8	951,5	952,3	953,1	957,2
240					1037,7	1037,9	1038,1	1038,4	1038,7	1039,1	1039,4	1039,8	1040,3	1040,7	1041,2	1041,7	1042,2	1042,8	1045,8
260						1134,7	1134,5	1134,2	1134,1	1134,0	1133,9	1133,9	1134,0	1134,0	1134,1	1134,3	1134,5	1134,7	1136,3
280							1236,0	1235,0	1234,1	1233,3	1232,6	1232,0	1230,9	1231,4	1230,5	1230,2	1229,9	1229,7	1229,2
300								1343,4	1341,2	1339,2	1337,4	1335,7	1334,3	1332,9	1331,7	1330,6	1329,6	1328,7	1325,4
320									1460,8	1456,3	1452,4	1448,8	1445,6	1442,7	1440,1	1437,8	1435,6	1433,6	1425,9
340											1588,3	1579,7	1572,5	1566,2	1560,8	1555,9	1551,6	1547,7	1532,9
360													1742,9	1722,0	1707,2	1695,6	1686,1	1678,0	1650,5

الجدول A.9 الحجم النوعي للماء ولبخار الماء [m³/kg]

الضغط [bar]	درجة الحرارة [°C] 200	250	300	350	400	450	500	550	600	700	800
1	2,172	2,406	2,639	2,871	3,102	3,334	3,565	3,797	4,028	4,490	4,952
5	0,4250	0,4744	0,5226	0,5701	0,6172	0,6640	0,7108	0,7574	0,8039	0,8968	0,9896
10	0,2059	0,2327	0,2580	0,2824	0,3065	0,3303	0,3540	0,3775	0,4010	0,4477	0,4943
15	0,1324	0,1520	0,1697	0,1865	0,2029	0,2191	0,2350	0,2509	0,2667	0,2980	0,3292
20	0,0011725	0,1114	0,1255	0,1386	0,1511	0,1634	0,1756	0,1876	0,1995	0,2232	0,2467
25	0,0011555	0,08699	0,09893	0,10975	0,12004	0,13004	0,13987	0,14958	0,15921	0,17826	0,19714
30	0,0011550	0,07055	0,08116	0,09053	0,09931	0,10779	0,11608	0,12426	0,13234	0,14832	0,16412
35	0,0011545	0,05869	0,06842	0,07678	0,08449	0,09189	0,09909	0,10617	0,11315	0,12694	0,14054
40	0,0011540	0,0012512	0,05883	0,06645	0,07338	0,07996	0,08634	0,09260	0,09876	0,11090	0,12285
45	0,0011353	0,0012503	0,05134	0,05840	0,06472	0,07068	0,07643	0,08204	0,08757	0,09843	0,10910
50	0,0011530	0,0012494	0,04530	0,05194	0,05779	0,06325	0,06849	0,07360	0,07862	0,08845	0,09809
60	0,0011519	0,0012476	0,03614	0,04222	0,04738	0,05210	0,05659	0,06094	0,06518	0,07348	0,08159
70	0,0011511	0,0012461	0,02946	0,03523	0,03992	0,04413	0,04809	0,05189	0,05559	0,06279	0,06980
80	0,0011501	0,0012443	0,02426	0,02995	0,03431	0,03814	0,04170	0,04510	0,04839	0,05477	0,06096
90	0,0011491	0,0012426	0,0014030	0,02579	0,02993	0,03348	0,03674	0,03982	0,04280	0,04853	0,05408
100	0,0011482	0,0012409	0,0013987	0,02242	0,02641	0,02974	0,03276	0,03560	0,03832	0,04355	0,04858
120	0,0011463	0,0012376	0,0013904	0,01721	0,02108	0,02412	0,02679	0,02926	0,03160	0,03607	0,04033
140	0,0011444	0,0012344	0,0013827	0,01321	0,01723	0,02008	0,02251	0,02472	0,02680	0,03072	0,03444
160	0,0011426	0,0012312	0,0013754	0,009764	0,01427	0,01703	0,01929	0,02132	0,02320	0,02672	0,03002
180	0,0011408	0,0012283	0,0013685	0,0017122	0,01191	0,01464	0,01678	0,01867	0,02040	0,02360	0,02659
200	0,0011390	0,0012253	0,0013619	0,0016728	0,009947	0,01271	0,01477	0,01655	0,01816	0,02111	0,02385
250	0,0011343	0,0012175	0,0013453	0,0016000	0,006014	0,009171	0,01113	0,01272	0,01413	0,01663	0,01891
300	0,0011301	0,0012107	0,0013316	0,0015540	0,002831	0,006735	0,008681	0,01017	0,01144	0,01365	0,01562
350	0,0011260	0,0012042	0,0013191	0,0015186	0,002111	0,004956	0,006925	0,008342	0,009519	0,01152	0,01327
400	0,0011220	0,0011981	0,0013077	0,0014896	0,001909	0,003675	0,005616	0,006982	0,008088	0,009930	0,01152
500	0,0011444	0,0011866	0,0012874	0,0014438	0,001729	0,002492	0,003882	0,005113	0,006111	0,007720	0,009076
600	0,0011073	0,0011761	0,0012698	0,0014083	0,001632	0,002084	0,002952	0,003947	0,004835	0,006269	0,007460
800	0,0010941	0,0012573	0,0012401	0,0013547	0,001518	0,001772	0,002188	0,002764	0,003379	0,004519	0,005481

الجدول **A.10** السعة الحرارية النوعية الوسطية بثبوت الضغط للغازات المثالية c_p [kJ/kgK]

t [°C]	Luft	N_2^*	N_2	O_2	CO_2	H_2O	SO_2
−60	1,0030	1,0303	1,0392	0,9123	0,7831	1,8549	0,5915
−40	1,0032	1,0304	1,0392	0,9130	0,7943	1,8561	0,5971
−20	1,0034	1,0304	1,0393	0,9138	0,8055	1,8574	0,6026
0	1,0037	1,0305	1,0394	0,9148	0,8165	1,8591	0,6083
20	1,0041	1,0306	1,0395	0,9160	0,8273	1,8611	0,6139
40	1,0046	1,0308	1,0396	0,9175	0,8378	1,8634	0,6196
60	1,0051	1,0310	1,0398	0,9191	0,8481	1,8660	0,6252
80	1,0057	1,0313	1,0401	0,9210	0,8580	1,8690	0,6309
100	1,0065	1,0316	1,0404	0,9230	0,8677	1,8724	0,6365
120	1,0073	1,0320	1,0408	0,9252	0,8771	1,8760	0,6420
140	1,0082	1,0325	1,0413	0,9276	0,8863	1,8799	0,6475
160	1,0093	1,0331	1,0419	0,9301	0,8952	1,8841	0,6529
180	1,0104	1,0338	1,0426	0,9327	0,9038	1,8885	0,6582
200	1,0117	1,0346	1,0434	0,9355	0,9122	1,8931	0,6634
250	1,0152	1,0370	1,0459	0,9426	0,9322	1,9054	0,6759
300	1,0192	1,0401	1,0490	0,9500	0,9509	1,9185	0,6877
350	1,0237	1,0437	1,0526	0,9575	0,9685	1,9323	0,6987
400	1,0286	1,0477	1,0568	0,9649	0,9850	1,9467	0,7090
450	1,0337	1,0522	1,0613	0,9722	1,0005	1,9615	0,7185
500	1,0389	1,0569	1,0661	0,9792	1,0152	1,9767	0,7274
550	1,0443	1,0619	1,0712	0,9860	1,0291	1,9923	0,7356
600	1,0498	1,0670	1,0764	0,9925	1,0422	2,0082	0,7433
650	1,0552	1,0722	1,0816	0,9988	1,0546	2,0244	0,7505
700	1,0606	1,0775	1,0870	1,0047	1,0664	2,0408	0,7571
750	1,0660	1,0827	1,0923	1,0104	1,0775	2,0574	0,7633
800	1,0712	1,0879	1,0976	1,0158	1,0881	2,0741	0,7692
850	1,0764	1,0930	1,1028	1,0209	1,0981	2,0909	0,7746
900	1,0814	1,0981	1,1079	1,0258	1,1076	2,1077	0,7797
950	1,0863	1,1030	1,1130	1,0305	1,1167	2,1246	0,7846
1000	1,0910	1,1079	1,1179	1,0350	1,1253	2,1414	0,7891
1050	1,0956	1,1126	1,1227	1,0393	1,1335	2,1582	0,7934
1100	1,1001	1,1172	1,1274	1,0434	1,1414	2,1749	0,7974
1150	1,1045	1,1217	1,1319	1,0474	1,1489	2,1914	0,8013
1200	1,1087	1,1260	1,1363	1,0512	1,1560	2,2078	0,8049
1250	1,1128	1,1302	1,1406	1,0548	1,1628	2,2240	0,8084
1300	1,1168	1,1343	1,1448	1,0584	1,1693	2,2400	0,8117
1400	1,1243	1,1422	1,1528	1,0651	1,1816	2,2714	0,8178
1500	1,1315	1,1495	1,1602	1,0715	1,1928	2,3017	0,8234
1600	1,1382	1,1564	1,1673	1,0775	1,2032	2,3311	0,8286
1700	1,1445	1,1629	1,1739	1,0833	1,2128	2,3594	0,8333
1800	1,1505	1,1690	1,1801	1,0888	1,2217	2,3866	0,8377
1900	1,1561	1,1748	1,1859	1,0941	1,2300	2,4127	0,8419
2000	1,1615	1,1802	1,1914	1,0993	1,2377	2,4379	0,8457
2100	1,1666	1,1853	1,1966	1,1043	1,2449	2,4620	0,8493
2200	1,1714	1,1901	1,2015	1,1092	1,2517	2,4851	0,8527

الجدول A.11 القيم الحرارية لحوامل الطاقة

عامل *HCU	القيمة الحرارية kJ	الواحدة	حامل الطاقة
1.017	29 809	kg	الفحم الحجري
0.978	28 650	kg	فحم الكوك المستخرج من الفحم الحجري
1.071	31 401	kg	قوالب الفحم الحجري
0.283	8 303	kg	الفحم البني
0.657	19 259	kg	قوالب الفحم البني
0.511	14 980	kg	الفحم البني القاسي
0.500	14 654	kg	خشب الإحراق ($1m^3$ = 0.7 t)
0.486	14 235	kg	فحم المستنقعات القابل للإحراق
0.290	8 499	kg	الوحل الناتج عن معالجة مياه المجاري
1.454	42 622	kg	النفط الخام
1.486	43 543	kg	بنزين المحركات، بترول المحركات
1.486	43 543	kg	البنزين الخام
1.486	43 543	kg	بنزين الطائرات، الوقود الخفيف للعنفات الغازية على الطائرات
1.457	42 702	kg	الوقود الثقيل المستخدم للعنفات الغازية على الطائرات، النفط
1.457	42 702	kg	وقود الديزل (المازوت)
1.457	42 702	kg	وقود التدفئة الخفيف
1.400	41 031	kg	وقود التدفئة الثقيل
1.000	29 308	kg	الكوك المستخرج من النفط
1.566	45 887	kg	الغاز المميَّع
1.650	48 358	kg	غاز المصافي النفطية
0.546	15 994	m^3	غاز التحويل إلى فحم كوك (غاز التكويك) غاز المدينة
0.143	4 187	m^3	غاز الأفران العالية
1.083	31 736	m^3	الغاز الطبيعي
1.375	40 300	m^3	غاز النفط الخام (الغاز المرافق)
0.546	15 994	m^3	الغاز الذي يتواجد غالباً في جبال الفحم الحجري (ميثان)
0.546	15 994	m^3	الغاز الناتج عن معالجة مياه المجاري
1.350	39 565	kg	النفط الخام.
1.286	37 681	kg	القطران الخام
1.286	37 681	kg	القار (الزفت)
1.314	38 520	kg	الفحوم الهيدروجينية الأخرى
1.329	38 937	kg	المنتجات الأخرى من الزيت المعدنية

* المقصود بـــ HCU واحدة الفحم الحجري الذي قيمته الحرارية 29300 kg/kg (Hard Coal Unit)

عامل HCF = القيمة الحرارية للوقود / 29300 (Hard Coal Factor)

الجدول A.12 السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط للهواء عند الضغط من 1 حتى 300 bar بالـ [kg/kgK]

300	200	150	100	50	25	1	P [bar]
1.4087	1.3612	1.3022	1.2156	1.1116	1.0579	1.0065	t = 0°C
1.2816	1.2288	1.1866	1.1335	1.0720	1.0395	1.0080	50°C
1.2045	1.1614	1.1316	1.0959	1.0549	1.0330	1.0117	100°C

الجدول A.13 القيم المميزة للهواء الجاف عند 1.013 bar

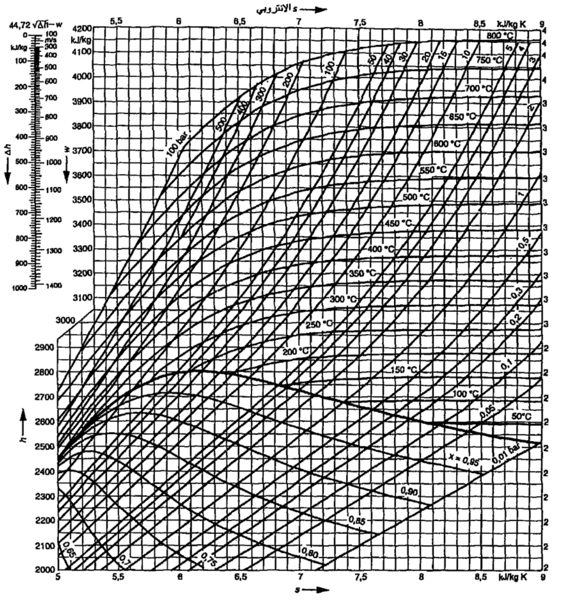
t	c_p	λ	$10^5 \cdot \eta$	$10^6 \cdot \nu$	$10^6 \cdot a$	Pr
°C	kJ/(kg · K)	W/(m · K)	kg/(m · s)	m^2/s	m^2/s	–
−150	1,026	0,0120	0,870	3,11	4,19	0,74
−100	1,009	0,0165	1,18	5,96	8,28	0,72
−50	1,005	0,0206	1,47	9,55	13,4	0,715
0	1,005	0,0243	1,72	13,30	18,7	0,711
20	1,005	0,0257	1,82	15,11	21,4	0,713
40	1,009	0,0271	1,91	16,97	23,9	0,711
60	1,009	0,0285	2,00	18,90	26,7	0,709
80	1,009	0,0299	2,10	20,94	29,6	0,708
100	1,013	0,0314	2,18	23,08	32,8	0,704
120	1,013	0,0328	2,27	25,23	36,1	0,70
140	1,013	0,0343	2,35	27,55	39,7	0,694
160	1,017	0,0358	2,43	29,85	43,0	0,693
180	1,022	0,0372	2,51	32,29	46,7	0,69
200	1,026	0,0386	2,58	34,63	50,5	0,685
250	1,034	0,0421	2,78	41,17	60,3	0,68
300	1,047	0,0454	2,95	47,85	70,3	0,68
350	1,055	0,0485	3,12	55,05	81,1	0,68
400	1,068	0,0516	3,28	62,53	91,9	0,68
450	1,080	0,0543	3,44	70,54	103,1	0,685
500	1,093	0,0570	3,58	78,48	114,2	0,69
600	1,114	0,0621	3,86	95,57	138,2	0,69
700	1,135	0,0667	4,12	113,7	162,2	0,70
800	1,156	0,0706	4,37	132,8	185,8	0,715
900	1,172	0,0741	4,59	152,5	210	0,725
1000	1,185	0,0770	4,80	173	235	0,735

t درجة الحرارة
c_p السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط
λ عامل التوصيل الحراري
η اللزوجة الديناميكية (الحركية)
ν اللزوجة التحريكية
a عامل نفوذ الحرارة
Pr رقم برانتل

الجدول A.14 القيم المميزة للماء عند 0.981 bar أو عند ضغط الإشباع

t	p	ϱ	c_p	λ	$10^3 \cdot \beta$	$10^3 \cdot \eta$	$10^6 \cdot \nu$	$10^6 \cdot a$	Pr
°C	bar	kg/m³	kJ/(kg · K)	W/(m · K)	1/K	kg (m · s)	m²/s	m²/s	–
0	0,9807	999,8	4,218	0,552	– 0,07	1,792	1,792	0,131	13,67
10		999,7	4,192	0,578	+ 0,088	1,307	1,307	0,138	9,47
20		998,2	4,182	0,598	0,206	1,002	1,004	0,143	7,01
30		995,7	4,178	0,614	0,303	0,797	0,801	0,148	5,43
40		992,2	4,178	0,628	0,385	0,653	0,658	0,151	4,35
50		988,0	4,181	0,641	0,457	0,548	0,554	0,155	3,57
60		983,2	4,184	0,652	0,523	0,467	0,475	0,158	3,00
70		977,8	4,190	0,661	0,585	0,404	0,413	0,161	2,56
80		971,8	4,196	0,669	0,643	0,355	0,365	0,164	2,23
90		965,3	4,205	0,676	0,698	0,315	0,326	0,166	1,96
100	1,0132	958,4	4,216	0,682	0,752	0,282	0,295	0,169	1,75
120	1,9854	943,1	4,245	0,686	0,860	0,235	0,2485	0,171	1,45
140	3,6136	926,1	4,287	0,684	0,957	0,199	0,215	0,172	1,25
160	6,1804	907,4	4,324	0,682	1,098	0,172	0,1890	0,173	1,09
180	10,027	886,9	4,409	0,676	1,233	0,151	0,1697	0,172	0,98
200	15,550	864,7	4,497	0,666	1,392	0,136	0,1579	0,171	0,92
220	23,202	840,3	4,610	0,653	1,597	0,125	0,1488	0,168	0,88
240	33,480	813,6	4,760	0,636	1,862	0,166	0,1420	0,164	0,87
260	46,491	784,0	4,978	0,612	2,21	0,107	0,1365	0,157	0,87
280	64,191	750,7	5,309	0,581	2,70	0,0944	0,1325	0,145	0,91
300	85,917	712,5	5,86	0,541	3,46	0,0935	0,1298	0,129	1,00
320	112,89	667,0	6,62	0,491	4,60	0,0856	0,1282	0,111	1,15
340	146,08	609,5	8,37	0,430	8,25	0,0775	0,1272	0,0844	1,5
360	186,74	524,5	13,4	0,349		0,0683	0,1306	0,0500	2,6
374,3	221,24	326	∞	0,209	∞	0,0506	0,155	0	∞

t درجة الحرارة
p الضغط
ϱ الكتلة النوعية
c_p السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط
λ عامل التوصيل الحراري
β عامل التمدد الحجمي
η اللزوجة الديناميكية (الحركية)
ν اللزوجة التحريكية
a عامل نفوذ الحرارة
Pr رقم برانتل



الشكل A.1 مخطط h-s لبخار الماء

تعريف الرموز

A محتوى الوقود من الرماد [kg/kg]

A المساحة [m^2]

a نفوذية المائع [m^2/s]

Ar = $g\,d^3\,(\rho - \rho)\,/\,\rho\,\nu^2$ رقم أرخميدس

B شدة الحقل المغناطيسي [T]

b الاستهلاك النوعي للوقود [kg/kWh]

C محتوى الوقود من الكربون (الفحم) [kg/kg]

C نسبة التركيز للمجمع

C عامل إشعاع الجسم [W/m^2K^4]

C_o = 5.67 W/m^2K^4 عامل إشعاع الجسم الأسود

C_p قرينة الاستطاعة

c السعة الحرارية النوعية [J/kg K]

c_B السعة الحرارية النوعية للوقود [J/kgk]

c_p السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط [J/kg K]

$c_{p,a}$ السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط للهواء [J/m^3K]

$c_{p,W}$ السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط للماء [J/kg K]

c_v السعة الحرارية النوعية بثبوت الحجم [J/kg K]

d القطر [m]

E كثافة تيار الإشعاع [W/m^2]

E_k الطاقة الحركية [J]

E_p الطاقة الكامنة للموقع [J]

F القوة [N]

F = 96487 C/Mol ثابت فاراداي

F_R عامل التصريف أو النقل الحراري للمجمع الشمسي

G الطاقة الحرة [J]

g التسارع الأرضي [m/s^2]

Gr رقم غراسهوف ($Gr = g l^3/\nu^2\ \beta\,\Delta T$)

H الإنتالبي [J]

H محتوى الوقود من الهيدروجين [kg/kg]

H الارتفاع عن مستوٍ مرجعي [m]

h الإنتالبي النوعي [J/kg]

HCL القيمة الحرارية العليا للوقود [J/KG أو m^3]

H_{vap} الإنتالبي النوعي للتبخر [J/kg]

I شدة الإشعاع الإجمالية في المستوى الأفقي [W/m^2]

I شدة التيار الكهربائي [A]

I_D شدة الإشعاع المباشر في المستوي الأفقي [W/m^2]

I_{Dk} شدة الإشعاع المباشر في مستوي المجمع المائل [W/m^2]

I_d شدة الإشعاع المنتشر في المستوي الأفقي [W/m^2]

I_{dk} شدة الإشعاع المنتشر في مستوي المجمع المائل [W/m^2]

I_k شدة الإشعاع الإجمالي في مستوي المجمع المائل [W/m^2]

I_k تيار القصر [A]

k أس الايزنتروبي

k عامل نفوذ الحرارة [W/m^2K]

K_k عامل الضياعات الحرارية الإجمالية للمجمع الشمسي [W/m^2K]

L طول الأنبوب [m]

l الطول المميز (مثل قطر الأنبوب d) [m]

LCV القيمة الحرارية الدنيا للوقود J/kg أو m^3

M عزم الدوران [N m]

M الكتلة المولية [kg/k Mol]

m الكتلة [kg]

m التدفق الكتلي [kg/s] (يشار إليه غالباً في المراجع بـــ m)

m_F استهلاك الوقود [kg/s]

mv التدفق الكتلي للبخار الطازج [kg/s]

N محتوى الوقود من الآزوت (النتروجين) [kg/kg]

n عدد الدورات [min^{-1}]

Nu $= \alpha l / \lambda$ رقم نوسِل

O محتوى الوقود من الأوكسجين [kg/kg]

O_{min} الاستهلاك الأصغري للأوكسجين اللازم لإحراق الوقود [وقود kg/kg]

P الاستطاعة [W]

P_{el} الاستطاعة الكهربائية لمحطة توليد الطاقة [W]

P_{st} استطاعة العنفة البخارية [W]

P_{GT} استطاعة العنفة الغازية [W]

P_T استطاعة العنفة [W]

p الضغط [Pa]

p_i الضغط الجزئي لأحد مركبات غازات الاحتراق [Pa]

p_{dyn} الضغط الديناميكي[Pa]

Pr رقم برانتل $Pr = \nu/a = \mu c_p/\lambda$

Q كمية الحرارة [J]

Q التدفق (التيار) الحراري [J] (تعرف في المراجع غالباً بِـــ Q)

Q_G الاستطاعة الحَرارية المفيدة لغازات الاحتراق [W]

Q_R كمية الحرارة المطروحة [J]

$Q_{C.C}$ الاستطاعة الحرارية لحجرة احتراق العنفة الغازية [W]

Q_k الاستطاعة الحرارية المفيدة للمجمع الشمسي [W]

Q_{CW} الاستطاعة الحرارية المفيدة لماء تبريد المبادل الحراري [W]

Q_u الاستطاعة الحرارية المفيدة [W]

Q_{AF} الاستطاعة الحرارية للوقود الإضافي الذي يحرق [W]

Qs كمية الحرارة المضافة [J]

q كثافة التيار الحراري [W/m²]

q_A التحميل السطحي لحجرة الاحتراق [W/m²]

q_R الحرارة النوعية المطروحة [J/kg]

q_G التحميل الحراري لمحيط الحراقات (أي لجدران حجرة الاحتراق) [W/m²]

q_{spec} الاستهلاك الحراري النوعي لمحطة الطاقة [kJ/kWh]

q_v التحميل الحجمي لحجرة الاحتراق [W/m³]

q_s الحرارة النوعية المضافة [J/kg]

R ثابت الغاز [J/kg K]

R المقاومة الحرارية [m² K/W]

R_i المقاومة الداخلية [Ω]

r_{CO} نسبة حجم CO في غازات الاحتراق [m³/m³]

r_{CO_2} نسبة حجم CO_2 في غازات الاحتراق [m³/m³]

r_{H_2O} نسبة حجم H_2O في غازات الاحتراق [m³/m³]

r_i نسبة حجم إحدى مركبات الغاز في غازات الاحتراق [m³/m³]

R_a رقم ريلية $R_a = Gr\,Pr = g\beta\,\Delta T\,l^3/\nu\,a$

R_e رقم رينولدز $w / l\,\nu =$

S الانتروبي [J/K]

S محتوى الوقود من الكبريت [kg/kg]

s الانتروبي النوعي [J/kgK]

T درجة الحرارة [K]

t درجة الحرارة [°C]

t_f درجة حرارة المائع [°C]

t_a درجة حرارة الهواء [°C]

t_{amb} درجة حرارة الوسط المحيط [°C]

t_2 درجة حرارة ماء التدفئة العائد [°C]

t_{th} درجة حرارة الاحتراق النظرية (الكظيمة) [°C]

t_s درجة حرارة الإشباع [°C]

t_1 درجة حرارة ماء التدفئة الذاهب [°C]

t_W درجة حرارة الجدار [°C]

U التوتر (الجهد، الضغط) [V]

U_0 توتر العمل بدون حمل [V]

u المركبة المحيطية للسرعة [m/s]

x نسبة البخار في البخار الرطب [kg/kg]

x محتوى الهواء من الرطوبة [kg هواء جاف / kg بخار ماء]

V الحجم [m³]

v الحجم النوعي [m³/kg]

V_{GS} كمية غازات الاحتراق الناتجة عن إحراق كغ وقود [m³/kg]

V_{CO_2} كمية ثاني أوكسيد الكربون في غازات الاحتراق [m³ من الـــ CO_2 / kg وقود]

V كمية غازات الاحتراق الرطبة [kg/m³ وقود]

V_{dry} كمية غازات الاحتراق الجافة [kg/m³ وقود]

V_{H_2O} كمية بخار الماء في غازات الاحتراق [m^3 بخار ماء /kg وقود]

V_{N_2} كمية الآزوت (النتروجين) في غازات الاحتراق [m^3 من الـ N_2 /kg وقود]

V_{O_2} كمية الأوكسجين في غازات الاحتراق [m^3 من الـ O_2 / kg وقود]

V_{SO_2} كمية ثاني أوكسيد الكبريت في غازات الاحتراق [m^3 من الـ SO_2 / kg وقود]

W العمل [J]

W محتوى الوقود من الماء [kg/kg]

W_{exp} عمل التمدد [J]

W_{comp} عمل الانضغاط [J]

w سرعة الجريان [m/s]

w_a سرعة انجرار الحبيبات (لفرشة الوقود الدوامية)

w_{mf} سرعة التسييل (التمييع) الدنيا [m/s]

w_u العمل النوعي المفيد [J/kg]

w_p العمل النوعي المستهلك للمضخة [J/kg]

w_T العمل النوعي للعنفة [J/kg]

z ارتفاع المقطع المدروس عن مستوٍ مرجعي [m]

الرموز اليونانية

α درجة الامتصاص

α عامل Seebeck [V/K]

α عامل انتقال الحرارة [W/m^2K]

α_c عامل انتقال الحرارة بالحمل [W/m^2K]

α_{Rad} عامل انتقال الحرارة بالإشعاع [W/m^2K]

β نسبة الضغط

β زاوية ميل المجمع الشمسي (درجة Grad)

β عامل التمدد الحجمي للمائع [1/K]

ΔG تغير الطاقة الحرة

Δh هبوط الإنتالبي [J/kg]

Δh_T الهبوط الإيزنتروبي للإنتالبي في العنفة [J/kg]

Δp ضياع الضغط [Pa]

Δp_e ضياع الضغط في المقاومات [Pa]

ΔP_{fr} ضياع الضغط بفعل الاحتكاك [Pa]

ΔT فرق درجات الحرارة [K]

Δt_m فرق درجات الحرارة الوسطي اللوغاريتمي [K]

ΔU تغير الطاقة الداخلية للجملة [J]

δ ميل الشمس [درجة Grad]

δ السماكة [m]

ε درجة الانبعاث

ε المسامية

ε نسبة الانضغاط

ε_{eff} درجة الإصدار الفعلية

η_c درجة تحويل الفحم

η_{SG} مردود مولد البخار

η_{SP} المردود الحراري لدورة البخار

η_G مردود المولد

η_{Good} درجة الجودة

$\eta_{CO.g}$ درجة الاستفادة من الطاقة في منشأة التوليد المشترك للحرارة والكهرباء

η_{total} المردود الإجمالي

η_{GT}	المردود الحراري للعنفة الغازية
η_{G+S}	المردود الإجمالي للدارة المركبة ذات العنفة الغازية والبخارية معاً
η_{iT}	المردود الداخلي للعنفة
η_k	مردود المجمع
η_{PS}	المردود الإجمالي لمحطة الطاقة
η_m	المردود الميكانيكي للعنفة ومتمماتها والمولد
η_{MHD}	مردود مولد MHD
η_{opt}	المردود البصري للمجمع
η_{th}	المردود الحراري لدورة العمل
$\eta_{th,C}$	المردود الحراري لدورة عمل كارنو
η_{Ga}	مردود عملية التحويل إلى غاز
θ	زاوية سقوط الشعاع المباشر على سطح أفقي [درجة Grad]
θ_k	زاوية سقوط الشعاع المباشر على سطح المجمع المائل [درجة Grad]
λ	عامل زيادة (فائض) الهواء
λ	عامل الاحتكاك
λ	عامل توصيل الحرارة [W/m K]
λ	طول الموجة [μm]
μ	اللزوجة الحركية للمائع [Pa × s]
ν	اللزوجة التحريكية للمائع [m^2/s]
ζ	نسبة الحرارة لآلة تبريد امتصاصية
ξ	عامل المقاومة
ρ	الكتلة النوعية [kg/m^3]
ρ	درجة الانعكاس
ρ	المقاومة النوعية [Ω m]
σ	$= 5.67 \times 10^{-8}$ W/m^2K^3 ثابت بولتزمان
σ	الرقم المميز للتيار في محطة التوليد المشترك للكهرباء والحرارة
τ	عامل التوصيل (الإرسال)
τ	الزمن [s]
φ	نسبة الحقن
φ	العرض الجغرافي [درجة Grad]
ω	سرعة الدوران [s^{-1}]
ω	الزاوية الساعية [درجة Grad]
ω_s	الزاوية الساعية لغياب الشمس [Grad]

تثبيت المراجع

[1] ADLHOCH, W., BOLT, N.: Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der Kombi-Kraftwerkstechnik. *VGB Kraftwerkstechnik, Bd. 74*, Nr. 7, S. 609—612, 1994.

[2] BECKER, B., FINCKH, H. H.: The 3A-series gas turbines. *Siemens Power Journal*, Aug. 1995, PP. 13—17.

[3] BMFT (Bundesministerium für Forschung und Technologie): *Regenerative Energien.* Bonn, 1992.

[4] BOHN, T.: *Gasturbinen, Kombi-, Heiz- u. Industriekraftwerke.* Grafelfing: Resch, Verlag, 1992.

[5] **GRASSE**, W., MACIAS, M., und SCHIEL, W.: Operating experiences with experimental solar thermal power plants in Spain and perspectives for near-term commercial applications. In: *VDI-Berichte 1024*, Düsseldorf, 1993.

[6] HAU, E.: *Windkraftanlagen.* Berlin: Springer Verlag, 1988.

[7] HERBERT, P. K., GI~IL, C. F.: Kombikraftwerke mit integrierter Kohlevergasung — Stand der Technik und Markteinführung. In: *Fortschrittlic lie Energiewandlung und -anwendung*, VDI-GET-Fachtagung, 24.— 25. 3. 1993, Bochum, 1993.

[8] KALLMEYER, D., ENGELHARD, J.: KoBra-Kombikraftwefk mit integrierter HTW-Braunkohlevergasung. *Brennstoff-Wiirine-K raft, Bd. 44*, 5. 388—391, 1992.

[9] Karita 360 MWe PFBC will be the first P800. *Modern Power Systems, Vol. 15*, Nr. 2, pp. 33, 35, 1995.

[10] KEHR, M.: Kraftwerksprojekte der 9Oer Jahre. *VGB Kraftwerkstechnik, Bd. 74*, Nr. 8, S. 705—710, 1994.

[11] KHARTCHENKO, N. V.: *Thermische Solaranlagen.* Berlin: Springer Verlag, 1995.

[12] KöTHE, H. K.: *Stromversorgung mit Solarzellen.* München: Franzis-Verlag, 1991.

[13] KOOPMANN, E. W.: Erfahrungen mit dem SHELL-Kohlevergasungsproze1~.

VGB Kraftwerkstechnik, Bd. 74, Nr. 11, 5. 974—977, 1994.

[14] **KRAUTZ,** H.-J., **CHALUPNIK,** R.: Braunkohle-Kombi-Kraftwerke mit zirkulierender Druckwirbelschichtfeuerung. *VGB Kraftwerkstechnik, Bd. 74,* Nr. 11, 5. 1010, 1994.

[15] **MATARE,** H. F., **FABER,** P.: Erneuerbare Energien. Düsseldorf: VDJ Verlag, 1993.

[16] PETZEL, H.-K.: Die Wirbelschichtfeuerung auf dem Weg zur betriebsgewährten GrolMeuerung? *VGB Kraftwerkstechnik, Bd. 75,* Heft 4, 5. 380—385, 1995.

[17] PEDERSEN, B. M.: Entwicklung der Windenergietechnologie und ihre Anwendung in Holland und Dänemark. *VDI-Berichte 1024,* S. 85—90, 1993.

[18] **RAEDER,** J., u. a.: *Kontrollierte Kernfusion.* Stuttgart: Teubner Verlag, 1981.

[19] **RECKNAGEL, SPRENGER, SCHRAMEK:** *Taschenbuch für Heizung — Klimateclinik.* München: Oldenburg Verlag, 69 ... 96/97. Auflage, 1994/95.

[20] *Renezvable Energy Sources for Fuels and Electricity.* Exec. editor: L. **BURNHAM.** London: Earthscan Publ., Washington D. C.: Island Press, 1993.

[21] **SCHULZ,** R.: *Geotliermische Energie.* Köln: C. F. Muller Verlag, 1992.

[22] **SCHNITZ,** K. W., **KOCH,** C.: *Kraft-Wiirme-Kopplung.* Düsseldorf: VDI Verlag, 1995.

[23] **TAKAHASHI, NAKABAYASHI, FUJITA** u. a.: Aktueller Stand der 350-MW-Wirbelschichtfeuerung Takehara und der 71-MW-Druckwirbelschichtfeuerung Wakamatsu der EPDC sowie der fortschrittlichen Stromerzeugung in Japan. *VGB Kraftwerkstechnik, Bd. 74,* Nr. 11, S. 1003, 1994.

[24] *VDI-Lexikon Energieteclinik.* Hrsg. H. **SCHAEFER** Düsseldorf: VDI Verlag, 1993.

[25] *VDI-Wärmeatlas.* 6. Aufl., Düsseldorf: VDI Verlag, 1991.

[26] **WETZEL,** R., **SCHELLBERG,** W.: Umweltfreundliche Kohlendruckvergasung nach dem PRENELOVerfahren. *Glueckauf Forschungshefte, Bd. 52,* Nr. 3, S. 134—142, 1991.

ملحق أبجدي للمصطلحات الفنية

انكليزي	ألماني	عربي
		أ
CO_2-Emission from power stations	CO_2-Emissionen von Kraftwerken	إطلاق محطات الطاقة لـ CO_2
Steam power	Dampfleistung	استطاعة البخار
Home consumption in power station	Energiebedarf des Kraftwerkes	الاستهلاك الذاتي في محطة توليد الطاقة
Energy reserves	Energiereserven	احتياطات الطاقة
Energy consumption	Energieverbrauch	استهلاك الطاقة
Energy use	Energierverwendung	استخدام الطاقة
Specific enthalpy	Spezifische Enthalpie	الانتالبي النوعي
Entropy	Entropie	الانتروبي
Integration of gasification	Integrierte Vergasung	إدخال عملية تحويل الوقود إلى غاز
Dimensionless numbers	Dimensionslose Kennzahlen	الأرقام اللابعدية المميزة
Nuclear fusion	Kernfusion	الاندماج النووي
Combustion of pulverized coal	Kohlenstaubfeuerung	إحراق مسحوق الفحم
Controlled thermonuclear fusion	Kontrollierte thermonukleare fusion	الاندماج الحراري المضبوط
Melting enthalpy	Schmelzenthalpie	انتالبي الانصهار
Flue gas recirculation	Rauchgasrückfuhrüng	استرجاع غازات الاحتراق
Solar radiation	Sonnenstrahlung	الإشعاع الشمسي
– Diffuse radiation	– Diffusstrahlung	– الإشعاع المنتثر
– Direct radiation	– Direktstrahlung	– الإشعاع المباشر
– Extraterrestrial	– Extraterrestrische	– إشعاع خارج الأرض
– Global radiation	– Globalstrahlung	– الإشعاع العام
Fundamentals of fluid mechanics	Strömungstechnische Grundlagen	أسس هندسة الجريان

– Fluidized bed	– Wirbelschicht	– الطبقة ذات الحركة الدوامية
Environmental damage	Umweltbelastung	الإضرار بالبيئة
Heat radiation	Wärmestrahlung	الإشعاع الحراري
Heat transfer	Wärmeübertragung	انتقال الحرارة
Wind power	Windleistung	استطاعة الرياح
Combustion	Verbrennung	الاحتراق
– Low emission of harmful substances	– Schadstoffarme	– القليل الإصدار للمواد الضارة
		ب
Vapour, steam	Dampf	البخار
– h-s diagram	– h-s Diagramm	– مخطط h-s للبخار
– State values	– Zustandsgrößen	– القيم المميزة لحالة البخار
Cooling tower	Kühlturm	برج التبريد
– Dry cooling tower	– Trockenkühlturm	– برج التبريد الجاف
– Wet cooling tower	– Nasskühlturm	– برج التبريد الرطب
		ت
Change of internal energy	Änderung der inneren Energie	تغير الطاقة الداخلية
Design, combustion chamber	Auslegung, Feuerraum	تصميم حجرة الاحتراق
Fuel composition	Brennstoff – Zusammensetzung	تركيب الوقود
Elementary analysis – fuel	Elementaranalyse – Brennstoff	التحليل العنصري للوقود
Energy conversion	Energieumwandlung	تحويل الطاقة
Heating, Furnace	Feuerung	التدفئة ـــ التسخين
– Environmentally friendly	– Umweltschonende	– الرفيق بالبيئة
Coal gasification	Kohlevergasung	تحويل الفحم إلى الغاز
Preheating of air, regenerative	Luftvorwärmung, regenerative	التسخين الأولي المتجدد للهواء
Intermediate cooling of air	Luftzwischenkühlung	التبريد الوسطي للهواء
NO – formation	NO- Bildung	تشكل NO
– NO of fuel	– Brennstoff – NO	– NO – الوقود
– Prompt NO	– Promptes NO	– NO – الآني
– Thermal NO	– Thermisches NO	– NO – الحراري
NO_X Reduction	NO_X Minderung	تقليل NO_X
Fluidized bed combustion	Wirbelschichtverbrennung	الاحتراق في فرشة الوقود الدوامية

Cross-section load	Querschnittlbelastung, Feuerung	التحميل عند المقطع ـــ التسخين
Preheating of feeding water, regenerative	Regenerative Speisewasservorwärmung	التسخين الأولي المتجدد لماء التغذية
Preheating of feeding water	Speisewasservorwärmung	التسخين الأولي لماء التغذية
Heat exchange, radiation	Strahlungsenergieaustausch	تبادل الحرارة بالإشعاع
Thermoelectric power change	Thermoelektische Energieumwandlung	تحول الطاقة الكهربائي ـــ الحراري
Heat conduction	Wärmeleitung	توصيل الحرارة
		ث
Solar-constant	Solarkonstante	الثابت الشمسي
		ج
Cooling water systems	Kühlwassersysteme	جمل تبريد الماء
– Drain-cooling water system	– Ablaufkühlsystem	– ذات الماء الضائع
– Flow-cooling water system	– Durchlaufkühlsystem	– ذات الماء الجاري
– Circulated water cooling	– Kreislaufkühlsystem	– ذات إعادة تدوير الماء
Solar module	Solarmodul	الجملة الشمسية
– MPP-point	– MPP Punkt	– نقطة MPP (الاستطاعة العظمى)
– Peak power	– Spitzenleistung	– استطاعة الذروة
Flow	Strömung	الجريان
Carburettor	Vergaser	جهاز تحويل الوقود إلى غاز
		ح
Biomass	Biomasse	الكتلة الحيوية
Burner	Brenner	الحراق
– Burner-belt-load	– Gürtelbelastung, Feuerung	–التحميل الحراري في الحزام المحيط بالحراقات
Combustion chamber	Brennkammer	حجرة الاحتراق
Energy carriers	Energieträger	حوامل الطاقة
Convection	Konvektion	الحمل الحراري (انتقال الحرارة بالحمل)
Specific volume	Spezifisches volumen	الحجم النوعي
		خ
Throttling	Drosselung	الخنق
Fuel cells	Brennstoffzellen	خلايا الوقود
– Alkaline	– Alkalische	– القلوية
– Solid oxide fuel cell	– Festelektrolyt (SOFC)	– ذات التحليل الكهربائي الصلبة (SOFC)

Compressed air energy storage	Druckluftspeicher	خزان الهواء المضغوط
Energy storage	Energiespeicher	خزان الطاقة
Latent heat storage medium	LWS-Speichermedium	وسائط تخزين الحرارة الكامنة
Seasonal heat storage	Saisonale wärmespeicher	الخزانات الحرارية الفصلية
Fly wheel storage	Schwungradspeicher	الخزانات ذات الدولاب المعدل
Storage medium	Speichermedium	وسيط التخزين
Thermo chemical	Thermochemische	الحرارية ـــ الكيميائية
Water heat storage	Wasserwärmespeicher	الخزانات الحرارية باستخدام الماء
Preheating mixer	Mischvorwärmer	خلاط التسخين الأولي
Solar cells	Solarzellen	الخلايا الشمسية
– Si – cell, Monocrystalline	– Si – Zellen, monokristalline	— خلايا السيلسيوم أحادية البلورة
– Si – cell, Polycristalline	– Si – Zellen, polykristalline	— خلايا السيليسيوم المتعددة البلورات
		د
Fly wheel	Scwungrad	الدولاب المعدل (الحدافة)
Degree of emission	Emissionsgrad	درجة الانبعاث
– Effective	– Ettektiver	— درجة الانبعاث الفعلية
Degree of absorption	Absorptionsgrad	درجة الامتصاص
Carton-cycle	Carnot-Kreisprozeß	دورة عمل كارنو
Clausius-Rankine-Cycle	Clausius-Rankine- Kreisprozeß	دورة عمل كلاوزيوس — رانكين
Cycle process	Kreißprozeß	دورة العمل
– Diesel	– Diesel	— دورة ديزل
– Joule	– Joule	— دورة جول
– Otto	– Otto	— دورة أوتو (للبترين)
Degree of reflection	Reflexionsgrad	درجة الانعكاس
Melting point	Schmelztemperatur	درجة حرارة الانصهار
Adiabatic combustion temperature	Adiabate Verbrennungstemperatur	درجة حرارة الاحتراق الكظيم (الأدياباتي)
		ر
Ash	Asche	الرماد
Graßhof-Nr.	Graßhof – Zahl	رقم غراسهوف
Nusselt-Nr.	Nusselt– Zahl	رقم نوسِل
Prandtl-Nr.	Prandtl– Zahl	رقم برانتل

Reynolds-Nr.	Reynolds– Zahl	رقم رينولدز
Rayleigh-Nr.	Rayleigh– Zahl	رقم ريليه
Current number	Stromkennzahl	الرقم المميز للتيار
		س
Desulphurization of flue gases	Entschweflung der Rauchgase	سحب الكبريت من غازات الاحتراق
– Washing with limewater	– Kalkwaschverfahren	– طريقة الغسيل بمحلول الكلس
– With sulphur generation	– mit Schwefelerzeugung	– مع إنتاج الكبريت
– With generation of gypsum	– mit Gipserzeugung	– مع إنتاج الجص
– Simultaneous	– Simultan	– المتزامن
Denitrification of flue gases	Entstickung der Rauchgase	سحب الآزوت من غازات الاحتراق
Heating surfaces of steam generator	Heizflächen der Dampferzeuger	سطوح التسخين لمولد البخار
– Necessary surface	Erforderlische Fläche	– السطح اللازم
Combined desulphurization and Denitrification	Entschweflung und Entstickung	السحب المشترك للكبريت والآزوت
Specific heat capacity	Spezifische Wärmekapazitat	السعة الحرارية النوعية
Removal of dry slag	Trocken-Schlackeabzug	سحب الخبث الجاف
Water separators	Wasserabscheider	ساحبات الماء
		ض
Heat loss of flue gases	Abgaswärmeverlust	الضياعات الحرارية مع غازات الاحتراق
Pressure loss (drop)	Druckverlust	ضياع الضغط
– Pressurized fluidized bed	– Druckwirbelschicht (DWS)	– في الطبقة ذات الحركية الزوبعية المضغوطة
– Individual resistances	– Einzelwiderstände	– في المقاومات المختلفة
– Moody-Colebrook Diagram	– Moody-Colebrook-Diagramm	– مخطط مودي لضياع الضغط
– Friction	– Reibung	– بفعل الاحتكاك
– Fluidized bed	– Wirbelschicht	– في الطبقة ذات الحركة الزوبعية
Heat loss through cooling	Wärmeverlust durch Abkühlung	الضياع الحراري بفعل التبرد
Heat loss through unburned fuel	Wärmeverlust durch Unverbranntes	الضياع الحراري بفعل عدم الاحتراق
Heat loss through slag	Wärmeverlust durch Schlackenwärme	الضياع الحراري مع الخبث
Heat losses of steamgenerator	Wärmeverluste des Dampferzeugers	الضياعات الحرارية لمولد البخار

		ط
Alternative energy	Alternative (regenerative) Energie	الطاقة البديلة (المتجددة)
Anergy	Anergie	الطاقة الضائعة
Energy	Energie	الطاقة
– Internal	– Innere	– الداخلية
– Kinetic	– Kinetische	– الحركية
– Potential	– Potentielle	– الكامنة
Hot-dry-rock-method	Hot-dry-rock-Verfahren	طريقة الصخور الجافة الساخنة
Exergy	Exergie	الطاقة المتاحة
Free energy	Freie energie, gibbssche	الطاقة الحرة (طاقة جيبس الحرة)
Regenerative energies	Regenerative energien	الطاقات المتجددة
– Biomass	– Biomasse	– الكتلة الحيوية
– Tidal power	– Gezeitenenergie	– المد والجزر
– Geothermal energy	– Geothermische Energie	– حرارة باطن الأرض
– Hydro power	– Hydroenergie	– طاقة المياه
– Ocean thermal energy	– Meereswärme	– حرارة البحار
– Growing raw materials	– Nachwachsende Rohstoffe	– المواد الخام المتزايدة
– Solar energy	– Sonnenenergie	– الطاقة الشمسية
– Waves energy	– Wellenenergie	– طاقة الأمواج
– Wind energy	– Windenergie	– طاقة الرياح
Fluidized bed	Wirbelschicht	الطبقة الدوامية
		ظ
Grean-house-effect	Treibhauseffekt	ظاهرة البيت الزجاجي
		ع
Work	Arbeit	العمل
– Volum change-work	– Volumenänderungsarbeit	– عمل تغير الحجم
– Technical	– Technische	– العمل الهندسي (المحرك)
Steam process	Dampfprozeß	عملية البخار
Steam turbine	Dampfturbine	العنفة البخارية
– Condensing turbine	– Kondensationsturbinen	– عنفة التكاثف
– High pressure	– Überdruckturbine	– ذات الضغط العالي

Expanision work	Expansionsarbeit	عمل التمدد
Gas turbines	Gasturbinen	العنفات الغازية
Back pressure turbine	Gegendruck-Dampfturbine	العنفات البخارية ذات الضغط العالي
Joule - process	Joule- Prozess	عملية جول
Excess air factor	Luftüberschußzahl	عامل زيادة (فائض) الهواء
Stoichiometric relations	Stöchiometrische Beziehungen	العلاقات الستيكومترية
Gasification process	Vergasungsprozess	عملية التحويل إلى غاز
Heat insulation	Wärmeschutz	عزل الحرارة
		ف
Lavel nozzle	Laval-Düse	فوهة لافال
Coal-composition	Kohle—Zusammensetzung	الفحم — تركيبه
Cyclon separator	Zyklonabscheider	الفاصل الدوار (السيكلوني)
Cyclon furnace	Zyklonfeuerung	الفرن السيكلوني
		ق
High calorific	Brennwert	القيمة الحرارية العليا للوقود
Calorific value	Heizwert	القيمة الحرارية
– Energy carrier	– Energieträger	— لحامل الطاقة
– Low	– Unterer	— الدنيا
Properties of substance	Stoffwerte	القيم المميزة لمادة
Nuclear forces	Bindungsenergie, nukleare	قوة الارتباط النووية
Stefan-Boltzman-Law	Stefan-Boltzmannsches Gesetz	قانون شتيفان — بولتزمان
		م
Heat recovery boiler	Abhitzekessel (AMK)	مرجل الحرارة الضائعة
Bernoulli-Equation	Bernoulli-Gleichung	معادلة برنولي
High calorific value-boiler	Bernnwertkessel	مرجل الاستفادة من القيمة الحرارية العليا للوقود
Steam generator	Dampferzeuger	مولد البخار
– Benson-boiler	– Benson-Kessel	— مرجل بنسون
– Natural circulation	– Naturumlauf	— المولدات ذات الجريان الطبيعي
– Forced circulation	– Zwangumlauf	— ذو الدوران القسري
– Once through	– Zwangdurchlauf	— ذو الجريان القصري مع الانسياب لمرة واحدة في الدورة

Steam-power station	Dampfkraftwerk	المحطة البخارية لتوليد الكهرباء
DENOX-equipment	DENOX- Anlagen	معدات سحب الأزوت
One-flux-steam generator	Einzug-Dampferzeuger	مولدات البخار ذات المجرى الأحادي للغازات
Combined power and heat generation stations with bleeding and back pessure	Entnahme-Gegendruck- Heizkraftwerk	محطات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة ذات سحب البخار والضغط المقابل (المعاكس)
Bleeding-condensing power station	Entnahme-Kondensationskraftwerk	محطات الطاقة ذات سحب البخار وتكثيفه
Euler-basic equation	Euler-Hauptgleichung	المعادلة الأساسية لأويلر
Euler-turbine equation	Euler-Turbinengleichung	معادلة أويلر للعنفات
Gas turbine power stations	Gasturbinenanlagen	المنشآت ذات العنفات الغازية
Geothermal power station	Geothermisches Kraftwerk	محطات الطاقة ذات حرارة جوف الأرض
Tidal power station	Gezeitenkraftwerk	محطات الطاقة ذات المد والجزر
Combined cycle power stations	Kombinierte Gas-und Dampf turbinenanlagen	محطات الدارة المركبة
Combined power and heat generation station	Heizkraftwerke	محطات التدفئة وتوليد الكهرباء
Condensers	Kondensatoren	المكثفات
MHD-Generator	MHD-Generator	مولدات MHD
Closed feed water heater	Oberflächen-Speisewasservorwärmer	مسخنات الماء الأولية المقفلة
PV-plants	Photovoltaik (PV) anlagen	المنشآت الكهرضوئية PV (الفتوفولطية)
– Thin solar cells	– Dünnschicht- Solarzellen	– الخلايا الشمسية الرقيقة
– p/n gate	– p/n Übergang	– الممر من النوع p/n
– Polycrisalline soler cells	– Polykristalline Solarzellen	– الخلايا الشمسية متعددة البلورات
– Solar generator	– Solargenerator	– المولد الشمسي
– Solar module	– Solarmodul	– المجموعة الشمسية
– Solar modul, MPP point	– Solarmodul MPP-Punkt	– نقطة الاستطاعة الأعظمية للمجموعة الشمسية
– Satellite power station,	– Satellitenkraftwerk	– محطات الطاقة ذات الأقمار الصناعية
– Island system	– Inselsystem	– جملة الجزيرة (غير المتصلة بشبكة الكهرباء الأساسية)
– With net connected system	– Netzgebundenes System	– الجملة الموصولة بالشبكة
Accumulators	Speicherbatterien	المدخرات (البطاريات)

Solar collector	Solarkollekroren	المجمّعات الشمسية
Concentrating collector	Konzentrierende Kollektoren	المجمّعات المركزة
Parabolic collector	Parabolrinnen Kollektoren	المجمع على شكل قطع مكافئ
Thermal-solar power station	Thermische Solarkraftwerke	محطات توليد الطاقة الحرارية
Thermo electrical generator	Thermoelektrischer Generator	المولد الكهربائي الحراري
– Efficiency	– Wirkungsgrad	– المردود
– Upwind-power station	– Aufwind-Kraftanlage	– ذات تيار الهواء المتصاعد
– Dish-Stirling system	– Dish-Stirling system	– الجملة ذات صحن ستيرلينغ
–Efficiency	– Effizienz	– الفعالية
– Heliostate	– Heliostaten	– ذات المرايا العاكسة الدوارة
– Solar farm concept	– Solarfarm-Konzept	– مشروع المزارع الشمسية
– Central receiver	– Zentralreceiver	– المستقبل المركزي
– Solar tower-concept	– Solarfarm-konzept	– مشروع البرج الشمسي
Super heater	Überhitzer	المحمص
Evaporator	Verdampfer	المبخر
Heat pumps	Wärmepumpen	المضخات الحرارية
Heat exchangers	Wärmeaustauscher	المبادلات الحرارية
Hydro power station (plant)	Wasser Kraftwerke	محطات توليد الطاقة المائية
Wind farm	Windpark	مزرعة الرياح
Wind power plant	Windkraftanlage	محطات طاقة الرياح
Thermal efficiency	Wirkungsgrad, thermischer	المردود الحراري
Efficiency	Wirkungsgrad	المردود (الكفاءة)
Internal efficiency	Wirkungsgrad, innerer	المردود الداخلي
Air preheater	Luftvorwärmer	المسخن الأولي للهواء
		هـ
Primary air	Primärluft	الهواء الأولي
Hydrogen	Wasserstoff	الهيدروجين



بدمشق



السعر : 18 دولار أو مايعادلها